

**DISEÑO DE LOS EQUIPOS DEL SISTEMA DE BOMBEO
ELECTROSUMERGIBLE PARA UN CAMPO UBICADO EN LA CUENCA DE
LOS LLANOS ORIENTALES A PARTIR DEL ANÁLISIS DE FALLA**

LIZETTE CAROLINA ACEVEDO SIERRA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2018

**DISEÑO DE LOS EQUIPOS DEL SISTEMA DE BOMBEO
ELECTROSUMERGIBLE PARA UN CAMPO UBICADO EN LA CUENCA DE
LOS LLANOS ORIENTALES A PARTIR DEL ANÁLISIS DE FALLA.**

LIZETTE CAROLINA ACEVEDO SIERRA

**Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero de Petróleos**

Director

**Erik Giovany Montes Páez
Ingeniero de Petróleos, M. Sc**

Co-director

**Diego Fernando León Quintero
Ingeniero Químico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2018

DEDICATORIA

A mis padres quienes han sido mi guía y camino durante mi vida, que con su ejemplo, dedicación y palabras de aliento siempre me impulsaron a soñar en grande y ser mejor de que siempre fui. Los amo.

A todas las personas que hicieron posible mi año de practica en Schlumberger, porque contribuyó enormemente en mi crecimiento personal y profesional.

A esas dos personas que hoy no se encuentran conmigo, pero que desde el cielo estoy seguro que me cuidan y celebran este triunfo en mi vida.

A todas aquellas personas que de una forma u otra aportaron a mi formación como profesional, a esos amigos que me deja la vida, profesores y demás personas que me ayudaron a forjar la persona que soy.

En general gracias a la vida por permitirme disfrutar este proceso llamado universidad y por permitirme alcanzar esos sueños que en algún momento tuve.

Carolina Acevedo

CONTENIDO

INTRODUCCION.....	16
1 PRINCIPALES CAUSAS DE FALLA DE CADA UNO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA BES	17
1.1 BOMBA CENTRIFUGA	17
1.1.1 Ambientes operativos/Características del fluido.	18
1.1.2 Abrasivos.	18
1.1.3 Corrosivos.	18
1.1.4 Alta relación gas-líquido (GLR) de los fluidos producidos.....	19
1.1.5 Deposición.	19
1.1.6 Rango de operación recomendado.	20
1.2 INTAKE.....	21
1.2.1 Ambientes operativos.....	21
1.2.2 Deposición.	21
1.2.3 Erosivo.	22
1.3 MOTOR	22
1.3.1 Causas comunes de falla	22
1.4 PROTECTOR	24
1.4.1 Ambientes operativos agresivos.	25
1.4.2 Abrasivo.	25
1.4.3 Alta temperatura – Elastómeros.....	25
1.4.4 Elevada relación gas-líquido..	26
1.4.5 Desviación / orientación.	26
1.4.6 Tratamientos Químicos.	26
1.4.7 Presión.....	27

1.5	CABLE.....	27
1.5.1	Causas y condiciones que generan daños al cable.	28
1.5.2	Manipulación.....	28
1.5.3	Empaques de suspensión de tuberías.	28
1.5.4	Alta temperatura.....	28
1.5.5	Cantidad de Gas.	29
1.5.6	Corrosión y H ₂ S.....	29
1.5.7	Productos químicos.....	30
2	PROCESO DE INVESTIGACION DE LA FALLA DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE	30
2.1	CICLO DE CONTINUO MEJORAMIENTO.....	31
2.2	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	33
2.3	ANÁLISIS DE FALLA.....	33
2.3.1	Técnicas para el análisis de causa raíz.	34
2.3.2	Diagramas de causa y efecto.....	34
2.3.3	Análisis del árbol de fallas.....	35
2.4	CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES	36
2.5	ANÁLISIS DE FALLA PARA 3 POZOS UBICADOS EN LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES	37
2.5.1	Análisis de falla para el pozo 1.	37
2.5.2	Sistema BES instalado en el pozo 1	38
2.5.3	Eventos del sensor.....	39
2.5.4	Observaciones durante el desmantelamiento del equipo.....	41
2.5.5	Causa de la falla.	44
2.5.6	Conclusión.	44
2.5.7	Recomendaciones	44
2.6	Análisis de falla para el pozo 2.	45
2.6.1	Causa de la falla.	45

2.6.2	Conclusión.	46
2.6.3	Recomendaciones	47
2.7	Análisis de falla para el pozo 3.	48
2.7.1	Causa de la falla.	48
2.7.2	Conclusión.	48
2.7.3	Recomendaciones	50
3	DISEÑO DEL EQUIPO DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE PARA CADA CASO ESTUDIADO.....	51
3.1	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO EN EL SOFTWARE DESINGPRO.....	51
3.1.1	Propiedades de los fluidos (Fluids).	51
3.1.2	Estado mecánico del pozo (Wellbore).....	53
3.1.3	Inflow.....	53
3.1.4	Criterios de Diseño.....	55
3.1.5	Selección de la Bomba Centrifuga.....	55
3.1.6	Separador de gas.....	58
3.1.7	Protector..	58
3.1.8	Motor.....	59
3.2	DISEÑO DEL EQUIPO DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE PARA CADA CASO ESTUDIADO CONSIDERANDO LAS CONDICIONES QUE LLEVARON A QUE EL EQUIPO EXTRAÍDO FALLARA	60
3.2.1	Diseño Pozo 1.....	61
3.2.2	Diseño pozo 2.	63
3.2.3	Diseño pozo 3..	65
3.2.4	Análisis del equipo instalado en el pozo 1 vs el equipo que falló previamente.	67
3.2.5	Análisis del equipo instalado en el pozo 2 vs el equipo que falló previamente.	67

3.2.6	Análisis del equipo instalado en el pozo 3 vs el equipo que falló previamente.	68
3.3	ANALISIS FINANCIERO	69
4	CONCLUSIONES.....	71
5.	RECOMENDACIONES.....	71
	BIBLIOGRAFIA.....	75
	ANEXOS.....	75

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ciclo de continuo mejoramiento	32
Ilustración 2. Diagrama de causa y efecto	35
Ilustración 3. Descripción del equipo instalado en el pozo 1	38
Ilustración 4. Datos del sensor del 25-Jul-16 al 26-Jul-16	39
Ilustración 5. Datos del sensor del 25-Jul-16 al 2-Ago-16.....	40
Ilustración 6. Datos del sensor del 4-Ago-16 al 8-Ago-16.....	40
Ilustración 7. Ruptura del eje y etapa cercana al área de la fractura	43
Ilustración 8. Elongación y discontinuidad de coraza.....	45
Ilustración 9. Lesión y degradación del EPDM.....	49
Ilustración 10. Ventana para el ingreso de propiedades de los fluidos.	53
Ilustración 11. Ventana para establecer el estado mecánico del pozo	54
Ilustración 12 Ventana para el modelamiento del desempeño del pozo	55
Ilustración 13 Ventana para ingresar datos de diseño	56
Ilustración 14 Ventana para la selección de la bomba.....	57
Ilustración 15 Grafica desempeño de la bomba.....	57
Ilustración 16 Ventana para la selección del separador.....	58
Ilustración 17 Ventana para la selección de los protectores	59
Ilustración 18 Ventana para la selección del motor.....	60
Ilustración 19 Equipo propuesto para el pozo 1	61
Ilustración 20 Equipo propuesto para el pozo 2.....	63
Ilustración 21 Equipo propuesto para el pozo 3.....	65
Ilustración 22 Diagrama partes de la bomba	75
Ilustración 23 Diagrama partes del intake	76
Ilustración 24 Diagrama partes del motor	76
Ilustración 25 Diagrama partes del protector	77
Ilustración 26 Bomba superior	79
Ilustración 27 Bomba central.....	79
Ilustración 28 Bomba inferior	80

Ilustración 29 Protector superior	80
Ilustración 30 Protector inferior	81
Ilustración 31 Motor	81
Ilustración 32 Bomba superior	82
Ilustración 33 Bomba inferior	82
Ilustración 34 Manejador de gas	83
Ilustración 35 Protector superior	83
Ilustración 36 Protector inferior	84
Ilustración 37 Motor	84
Ilustración 38 Bomba Superior.....	85
Ilustración 39 Bomba Center.....	85
Ilustración 40 Bomba inferior	86
Ilustración 41 Manejador de gas	86
Ilustración 42 Protector superior	86
Ilustración 43 Protector inferior	87
Ilustración 44 Motor	87
Ilustración 45 Datos del sensor del 20-Jul-16 al 5-Ago-16.....	89
Ilustración 46 Datos del sensor del 2-Ago-16 al 5-Ago-16.....	89
Ilustración 47 Datos del sensor del 30-Oct -16 al 31-Oct-16	90
Ilustración 48 Datos del sensor del 15-Jul-16 al 19-Jul-16	95
Ilustración 49. Datos del sensor del 15-Jul-16 al 22-Jul-16	95

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Historia de instalaciones BES en el pozo 1.....	38
Tabla 2. Equipo inspeccionado.....	41
Tabla 3. Datos básicos de diseño.....	52
Tabla 4. Información técnica del pozo 1.....	62
Tabla 5 Información técnica del pozo 2.....	64
Tabla 6 Información técnica del pozo 3.....	66
Tabla 7 Consumo eléctrico mensual.....	69
Tabla 8 Costo estimado de los equipos propuestos.....	70
Tabla 9 Materiales de la bomba.....	75
Tabla 10 Materiales del intake.....	76
Tabla 11 Materiales del motor.....	77
Tabla 12 Materiales del protector.....	78
Tabla 13 Tipos de Aislante del cable.....	78
Tabla 14 Historia de instalaciones BES en el pozo 2.....	88
Tabla 15 Equipo inspeccionado.....	91
Tabla 16 Historia de instalaciones BES en el pozo 3.....	94

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. DESCRIPCIÓN DE MATERIALES.....	67
Descripción detallada de los materiales usados para cada componente.....	67
ANEXO B. REGISTRO FOTOGRÁFICO.....	70
Registro fotográfico desmantelamiento equipo BES pozo 1	71
Registro fotográfico desmantelamiento equipo BES pozo 2	73
Registro fotográfico desmantelamiento equipo BES pozo 3	77
ANEXO C. ANÁLISIS DE FALLA	83
Análisis de falla para el pozo 2	84
Eventos del sensor.	84
Observaciones durante el desmantelamiento del equipo	85
Análisis de falla para el pozo 3	85
Eventos del sensor	87
Observaciones durante el desmantelamiento del equipo	87
ANEXO D. DATOS DE DISEÑO.....	91
Datos de diseño para el pozo 3.....	91
Datos de diseño para el pozo 3.....	93

RESUMEN

TITULO: DISEÑO DE LOS EQUIPOS DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE PARA UN CAMPO UBICADO EN LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES A PARTIR DEL ANÁLISIS DE FALLA *

AUTOR: LIZETTE CAROLINA ACEVEDO**

PALABRAS CLAVE: Bombeo electrosumergible, Análisis de Falla, Schlumberger.

DESCRIPCIÓN: El sistema de bombeo electrosumergible es uno de los sistemas más utilizados a nivel mundial, caracterizado por ofrecer una alta capacidad para producir volúmenes considerables desde diferentes profundidades, bajo una amplia variedad de condiciones de pozo, además es un sistema eficiente, y con alta adaptabilidad.

Existen condiciones que contribuyen a que el sistema de bombeo electrosumergible se deteriore, afectando su normal funcionamiento y llevándolo a una falla, esto genera grandes pérdidas económicas para el cliente. Por tal razón, es necesario monitorear el equipo de bombeo electrosumergible para identificar oportunamente los posibles problemas a los que se encuentra expuesto y tomar medidas preventivas.

Las fallas en el Sistema de bombeo electrosumergible pueden ser ocasionadas por diferentes condiciones: propiedades de los fluidos producidos, precipitación de componentes orgánicos e inorgánicos, presencia de sólidos, corrosión, alto contenido de gas, o la utilización del equipo fuera de los rangos operacionales recomendados.

Cuando las medidas preventivas no son suficientes para evitar una falla en el equipo, es necesario realizar el análisis de falla respectivo para identificar la causa raíz y las condiciones indirectas que contribuyeron a que el equipo fallara, para así definir estrategias que mitiguen o eliminen las intervenciones por esas causas.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director Erik Giovany Montes Páez. Co- director Ing. Diego Fernando León Quintero

ABSTRACT

TITLE: DESIGN OF THE ELECTRICAL SUMERSIBLE EQUIPMENT FOR A COLOMBIAN FIELD LOCATED IN THE BASIN OF THE EASTERN PLAINS THROUGHOUT FAILURE ANALYSIS

AUTHOR: LIZETTE CAROLINA ACEVEDO**

KEYWORDS: ESP system, failure analysis, Schlumberger.

DESCRIPTION: The ESP system is one of the most widely used systems worldwide, characterized by offering a high capacity to produce considerable volumes from different depths, under a wide variety of well conditions, it is also an efficient system, and with high adaptability.

There are conditions that contribute to the deterioration of the ESP system, affecting its normal operation and taking it to a failure, this generates economic losses for the client. For this reason, it is necessary to monitor the ESP equipment to identify in a timely manner the possible problems to which it is exposed and take preventive measures.

Failures in the ESP System can be caused by different conditions: properties of the fluids produced, precipitation of organic and inorganic components, presence of solids, corrosion, high gas content, or the use of the equipment outside the recommended operational ranges.

When the preventive measures are not enough to avoid a failure in the equipment, it is necessary to perform the respective failure analysis to identify the root cause and the indirect conditions that contributed to the equipment failure, in order to define strategies that mitigate or eliminate the interventions for those reasons

*Graduation Work

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Engineering of Petroleos. Director Erik Giovany Montes Paez. Co-director Ing. Diego Fernando Leon Quintero

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de recuperación artificial juegan un papel fundamental en la industria petrolera, ya que ofrecen una alternativa efectiva y de bajo costo a yacimientos que no tienen la energía para producir naturalmente. Gracias a la implementación de sistemas artificiales de levantamiento la producción puede mantenerse, haciendo de estos yacimientos, proyectos viables y rentables nuevamente.

Sin embargo, existen condiciones que contribuyen a que el sistema de bombeo electrosumergible se deteriore, afectando su normal funcionamiento y llevándolo a una falla, esto genera grandes pérdidas económicas para el cliente. Por tal razón, es necesario monitorear el equipo de bombeo electrosumergible para identificar oportunamente los posibles problemas a los que se encuentra expuesto y tomar medidas preventivas.

En el presente trabajo se pretende realizar el análisis de falla de tres pozos ubicados en la cuenca del Magdalena Medio, para llegar a la causa raíz de la falla, y posteriormente realizar una propuesta de rediseño considerando el análisis previamente realizado, con el fin de ofrecer un diseño capaz de suplir las necesidades del pozo, en términos de ambientes operacionales y capacidad de producción.

1 PRINCIPALES CAUSAS DE FALLA DE CADA UNO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA BES

1.1 BOMBA CENTRIFUGA

La bomba centrífuga de Schlumberger es una bomba de varias etapas, que contiene un número seleccionado (depende de la aplicación) de impulsores equipados con paletas, dentro de un difusor ajustado, situado en serie sobre el eje axial, el cual es accionado por el motor eléctrico.¹ Ver tabla 1 del anexo A, los materiales comúnmente usados para la bomba. Si bien las condiciones mecánicas pueden resultar en una falla o en desgaste prematuro de una bomba, existen muchas otras condiciones que pueden afectar su rendimiento.

- Deposición: estos materiales pueden originarse en el yacimiento o resultar de procesos de recuperación. La formación de arena, asfáltenos, ceras y parafinas son algunos de los materiales que pueden tapar los pasos de flujo y afectar seriamente el rendimiento de la bomba.
- La corrosión de componentes como el tubo de compresión, puede resultar en la pérdida de compresión del difusor que a su vez puede permitir que los difusores giren. Si los bordes de la etapa se corroen, los fluidos producidos pueden descargarse en las interfaces de la cabeza y de la base.
- La erosión como resultado de la producción de abrasivos también puede afectar seriamente la eficiencia general de la bomba, particularmente su capacidad para desarrollar la cabeza.
- El rendimiento de la entrada del depósito puede resultar en un desgaste mecánico que se manifiesta como desgaste de subida o desgaste por descenso.
- Los errores durante el proceso de montaje, ya sea en el Centro ART o en el sitio del pozo, también pueden provocar daños mecánicos.

¹ Schlumberger. Artificial lift Application Engineering Reference Manual. 2008, Ver. A, sec 3, p. 87

1.1.1 Ambientes operativos/Características del fluido. Los entornos de fondo de pozo en los que operan los sistemas BES son numerosos y pueden ser muy difíciles. Las bombas estándar están diseñadas para aplicaciones generales y brindarán una vida útil satisfactoria en condiciones de pozo moderadamente agresivas. Si bien son bastante robustas, en ambientes más agresivos puede ser prudente utilizar diferentes materiales o construir especificaciones que sean más adecuadas para ambientes más desafiantes. El material de la etapa estándar es Ni-Resist. Los materiales de las etapas se pueden procesar para mejorar su rendimiento en diferentes entornos operativos.²

1.1.2 Abrasivos. Uno de los ambientes desafiantes en los que operan los sistemas BES son los que incluyen materiales abrasivos en el fluido producido. Los materiales abrasivos pueden incluir algunos tipos de escamas, así como materiales arenosos, ya sea originarios de una formación de arenisca, arenas de fractura que pueden estar presentes en el yacimiento después de actividades de estimulación de pozos e incluso fluidos de perforación. Existen dos tipos de configuraciones para la abrasión, las bombas, "ARZ" que implica espaciar los conjuntos de cojinetes a intervalos a lo largo de la longitud de la bomba. Y "FBH" o "Carcasa de Cojinete Completo" significa que hay un juego de cojinetes en cada etapa de la bomba.³

1.1.3 Corrosivos. Los elementos corrosivos presentes en el fluido producido deben identificarse antes de que pueda implementarse una estrategia de revestimiento eficaz, ya que algunos materiales de recubrimiento pueden no ser compatibles con el medio ambiente.

Dependiendo del agente corrosivo, el revestimiento del exterior de los alojamientos de la bomba puede ser todo lo que se requiere. Los recubrimientos metalizados de

² Schlumberger. Artificial lift Application Engineering Reference Manual. 2008, Ver. A, sec 3, p. 98

³ Schlumberger. Artificial lift Application Engineering Reference Field Operations Reference Manual Surface. 2007, Ver. A, sec 2, p. 56

diversos materiales se aplican comúnmente a los housings. Algunos de los materiales utilizados incluyen Monel, acero inoxidable y carburo de tungsteno. Otras opciones también pueden estar disponibles. En algunos casos se puede recubrir el área interior de las cabezas y bases, aunque esto no es tan común. Los cambios metalúrgicos pueden ser una buena opción y el uso de housings, cabezales y bases de Redalloy es bastante común, aunque la cabeza Redalloy y el material de base no son compatibles en ambientes que incluyen H₂S.

1.1.4 Alta relación gas-líquido (GLR) de los fluidos producidos. El bloqueo de gas de las bombas centrífugas es una posibilidad, particularmente cuando las relaciones gas-líquido son muy altas y los caudales son bajos. El bloqueo de gas se produce cuando los pasos de flujo se llenan completamente con vapor. Las etapas que tienen pasos de flujo muy pequeños, tales como las etapas de flujo radial, están en mayor riesgo de bloqueo de gas.

Esta condición puede resultar en interrupciones de la producción, ya que el sistema BES idealmente apagará la subcarga cuando el vapor de densidad más ligera esté presente en la bomba. Si la unidad permanece apagada durante un período de tiempo adecuado, el nivel de fluido y la presión de entrada pueden recuperarse lo suficiente para reanudar la producción, pero a medida que el nivel de fluido y la presión de entrada disminuyen mientras hay producción, el gas libre se propagará de nuevo y la condición de bloqueo de gas probablemente repetirse.

1.1.5 Deposición. La deposición o asfáltenos pueden afectar seriamente el rendimiento de la bomba. La deposición puede aumentar la fricción entre los impulsores giratorios y los difusores estacionarios. El resultado final puede ser un fallo mecánico catastrófico como la rotura del eje.

La deposición dentro de los conductos de flujo puede impedir el flujo de líquidos a través de la bomba y dar lugar a una carga de motor errónea y un rendimiento de producción pobre. Muchas escamas se pueden disolver eficazmente usando

ácidos. Los tratamientos periódicos con inhibidores de incrustaciones pueden también impedir la precipitación de las escamas, sin embargo, algunas escamas pueden ser muy resistentes a estos tratamientos.

1.1.6 Rango de operación recomendado. El rango de operación recomendado esta expresado en unidades de volumen producido, donde la eficiencia operativa de la bomba cae dentro de niveles aceptables. Cuando una bomba no trabaja en el rango de operación recomendado, se dice que está trabajando en “upthrust” o “downthrust, lo que significa que tendrá empuje ascendente o descendente respectivamente causando daño al equipo.⁴

Hay tres componentes a considerar al discutir el empuje en lo que se refiere a la etapa de la bomba. El primer componente es el peso del impulsor en el fluido. El impulsor estará siempre sumergido en el fluido, lo que le permite flotar. Esto efectivamente reduce el peso del impulsor contra el difusor directamente debajo de él. Esta es una fuerza gravitatoria, y es típicamente en una dirección descendente. El segundo componente del empuje es la presión o la cabeza desarrollada dentro de la etapa. Cuando el fluido del pozo es empujado de un lugar a otro, se aplica una fuerza igual en la dirección opuesta. ⁵Esta fuerza también está típicamente en una dirección hacia abajo. Esta fuerza es generalmente la más grande de las tres fuerzas de lejos. El tercer componente de empuje es el volumen de fluido que entra en el impulsor. Esta fuerza está típicamente en una dirección ascendente.

Se dice entonces que una bomba trabaja en downthrust cuando está produciendo volúmenes del líquido por debajo del rango recomendado. Cuanto más lejos se opera por debajo del rango de funcionamiento recomendado, mayores serán las fuerzas de descenso y el desgaste resultante. Si estas fuerzas son suficientes para dar lugar a la pérdida del washer, habrá contacto directo entre el impulsor y el difusor debajo de él. Cuando una etapa está produciendo dentro de su rango de operación

⁴ Schlumberger. ESP Systems Components, Materials, and Specifications. 2006, Ver. A, p. 15

⁵ Schlumberger. ESP Systems Components, Materials, and Specifications. 2006, Ver. A, p. 16

recomendado, las fuerzas hacia abajo exceden la fuerza ascendente del fluido que entra en la etapa. Pero cuando el requerimiento de elevación del diseño BES es menor que el esperado por cualquier razón, la bomba puede producir volúmenes de fluido significativamente mayores a los del diseño y el impulsor puede ser empujado hacia arriba por el fluido entrante. A medida que se mueve hacia arriba entra en contacto con la parte inferior del difusor por encima de ella, en este caso se dice que la bomba está trabajando en upthrust. ⁶

1.2 INTAKE

El intake es el punto a través del cual el fluido del pozo entra en la bomba, normalmente está ubicado entre el protector y la bomba. Existen varios tipos de intakes disponibles para satisfacer los requisitos específicos de la aplicación. La mayoría de los dispositivos de entrada también proporcionan la capacidad de separación de gas. La eficiencia de la separación variará dependiendo de muchos factores, tales como el tipo de intake, su orientación en el pozo, la relación Gas-Líquido (GLR) y el caudal. Ver tabla 2 en el anexo A, los materiales comúnmente usados para el intake.

1.2.1 Ambientes operativos

1.2.2 Deposición. Los orificios de entrada de fluido y los orificios de ventilación de gas pueden quedar tapados o bloqueados con una variedad de materiales tales como incrustaciones, asfáltenos o materiales sedimentarios. Una entrada taponada puede impedir el movimiento del fluido dentro de la bomba y puede colapsar cuando la presión de salida intenta empujar los fluidos del pozo a través de una abertura disminuida.

Si los orificios de ventilación de gas de un separador de gas centrífugo se tapan, el

⁶ Ibid., p. 18

rendimiento del separador de gas puede verse afectado negativamente. ⁷

1.2.3 Erosivo. El desgaste erosivo puede estar indicado por el rayado de superficies tales como bushings y shaft sleeves, o la pared interior de los revestimientos de la carcasa. La erosión también puede estar indicada por una pérdida de material en componentes tales como el inductor, el impulsor de recogida o los pasos de flujo⁸

1.3 MOTOR

El motor es un dispositivo electromecánico y a diferencia de otros componentes tales como fallas en las bombas, las fallas del motor pueden ser de naturaleza eléctrica o mecánica. Las condiciones mecánicas pueden resultar en el fallo eléctrico final que da como resultado que el motor no funcione. En algunos casos, las condiciones eléctricas pueden producir fallas mecánicas o la incapacidad del motor para funcionar correctamente, aunque no se haya producido ninguna falla eléctrica o falla en el aislamiento. Ver tabla 3 en el anexo A, los materiales comúnmente usados para el motor.

1.3.1 Causas comunes de falla

- Corto eléctrico mecánico. El rotor se desgasta en las ranuras, fallo del aislamiento durante el devanado
- Cortocircuito eléctrico por contaminación. Entrada al motor de fluidos de pozos, cortes / limaduras.
- Cortocircuito eléctrico-temperatura. Calidad o cantidad del medio de enfriamiento, sobrecarga del motor, temperatura ambiente alta. Hay dos tipos de conexiones de los conductores del motor usadas con los motores. Estos son el tape-

⁷ Schlumberger. Artificial lift Application Engineering Reference Manual. 2008, Ver. A, sec 3, p. 120

⁸ Ibid., p. 122

in y el plug-in. Ambos tipos de conexiones deben ser controlados de cerca debido a la proximidad de los cables de alta tensión.

- Exposición a H₂S. Se presenta un color gris o ennegrecimiento de los anillos de cobre. Aunque no es necesariamente perjudicial para el propio rotor, puede ser muy perjudicial para el alambre del imán. El tamaño relativo de una molécula de H₂S es muy pequeño para que pueda penetrar fácilmente en la mayoría de las barreras. Una vez que entra en el motor puede moverse a través de los materiales aislantes de algunos cables magnéticos con bastante facilidad, y luego comenzará a reaccionar con el conductor de cobre por debajo.
- Tiempo de exposición: Se presenta decoloración general, donde este tipo de decoloración también puede estar relacionado con el tiempo de exposición.
- Oxidación. Esta es una fuerte indicación de que el agua ha entrado en el motor en algún momento.

Existen muchas condiciones que pueden provocar un fallo del estator como la temperatura en exceso del sistema de aislamiento, falla mecánico o relacionado con el proceso, ataque químico, tensiones transitorias. El sistema de aislamiento de un motor tiene una clasificación de temperatura, generalmente expresada en grados Fahrenheit. El sistema de aislamiento está diseñado para operar a esta temperatura durante 20.000 horas. Esto no quiere decir que el sistema de aislamiento del motor fallará si se supera esta temperatura. Con el aumento de la temperatura, la vida útil del aislamiento se reduce en un 50% con cada 10 grados Celsius adicionales (18 grados Fahrenheit).⁹

Las causas de fallas mecánicas son numerosas. Aunque es posible un cierto movimiento del alambre magnético dentro de las ranuras, el estator típicamente no tiene partes móviles. Pueden producirse fallos mecánicos cuando los componentes del conjunto del rotor, tales como los bujes, fallan y, posteriormente, permiten el

⁹ Schlumberger. Artificial lift Application Engineering Reference Manual. 2008, Ver. A, sec 4, p. 119

contacto entre los rotores y las laminaciones. Otro fallo mecánico que tiene su causa raíz en la temperatura es el crecimiento del rotor. Esta condición se produce cuando el conjunto del rotor comienza a alargarse debido a la expansión térmica. A medida que los rotores "crecen", entran en contacto con sus cojinetes de rotor adyacentes, resultando en desgaste de los anillos de extremo del rotor. A medida que los anillos terminales se desgastan, también se distorsionan y se "hinchan" hacia afuera, resultando a veces en contacto con las laminaciones del estator.¹⁰ En cualquier ejemplo, este contacto puede desgastarse a través de la pared de laminación y en y contra el aislamiento del alambre magnético, causando falla. La falla mecánica relacionada con el proceso puede resultar de las operaciones de devanado del estator tales como la formación de bobinas extremas, o tensionar el hilo magnético contra el punto en el que el hilo magnético entra en las ranuras de laminación.

El ataque químico puede ser otra causa del fallo del aislamiento. Por ejemplo, debido a su pequeño tamaño molecular, H₂S penetrará en el tiempo las diversas barreras en su lugar que impiden que la mayoría de los fluidos entren en el motor. Entonces comenzará a trabajar su manera a través del aislamiento del alambre del imán, después de que el componente del sulfuro reaccionará vigoroso con el cobre del alambre del imán. El subproducto de corrosión resultante - Sulfuro de cobre - puede hacer que algunos materiales aislantes se dividan, creando un camino de fuga al material de laminación. Una revisión cuidadosa de la química del fluido del pozo es crítica durante el proceso de diseño.

1.4 PROTECTOR

El protector sirve como enlace vital en todo el conjunto y, si no se emplea correctamente, puede reducir la vida útil general del equipo. El protector tiene diferentes funciones y deben considerarse cada una de ellas en el diseño general y en el proceso de aplicación para seleccionar la unidad correcta.

¹⁰ Ibid., p. 122

- Actuar como sello impidiendo que el fluido del pozo entre al motor.
- Actuar como depósito de aceite de expansión y contracción para el motor.
- Igualar la presión entre el motor y el fondo del pozo.
- Transmitir energía desarrollada por la bomba.
- Acoplar y transmitir torque desarrollado en el motor.

1.4.1 Ambientes operativos agresivos. A continuación, se presentan los ambientes operativos más agresivos para los protectores. Existe una gran variedad de materiales que puede ser utilizada para alargar la vida del equipo BES o diferentes configuraciones que pueden usarse para enfrentar los ambientes más agresivos. Ver tabla 4 en el anexo A, los materiales comúnmente usados para el protector.

1.4.2 Abrasivo. En ambientes en los que hay materiales abrasivos, el motor está expuesto a un mayor riesgo de contaminación, ya que la integridad del protector puede verse comprometida debido a daños radiales en componentes adyacentes. Cuando ocurre un daño radial, los fluidos del pozo pueden migrar a lo largo del eje del protector una vez que los sellos del eje se han dañado o de otra manera han quedado inoperantes. La integridad del sello del eje puede ser abordada de varias maneras, una cubierta más larga para la válvula de alivio de presión si se usan cámaras de sellado positivo. La cubierta más larga puede dificultar que los sedimentos interfieran con el funcionamiento de la válvula de alivio de presión en caso de que se requiera el ciclo.¹¹

1.4.3 Alta temperatura – Elastómeros. Para temperaturas menos severas, hay un par de opciones.

Mientras que el material de HSN es adecuado para temperaturas de operación a 350 grados de F, funcionará mejor a temperaturas debajo de 300 grados F.

¹¹ Schlumberger. Artificial lift Application Engineering Reference Manual. 2008, Ver. A, sec 6, p. 168

Las temperaturas de operación por encima de 300 grados F pueden resultar en endurecimiento del material HSN y una pérdida correspondiente de su elasticidad y propiedades de elongación. En consecuencia, una bolsa de HSN puede volverse frágil y romperse durante un ciclo de contracción. El material AFLAS funcionará bien a temperaturas de operación de hasta 400 grados F. (204 grados C). ¹²

1.4.4 Elevada relación gas-líquido. A medida que aumentan las proporciones de gas a líquido, disminuye la densidad general de los fluidos producidos, lo que hace más probable que los fluidos producidos se vuelvan miscibles con el aceite en el Protector. Estas situaciones deben ser revisadas caso por caso, pero generalmente se puede esperar que las cámaras de sellado positivo funcionen mejor en estas condiciones. En aplicaciones de alta GLR, si las densidades de fluido permiten una cierta separación de los fluidos producidos y del aceite de Protector, puede ser mejor colocar una cámara de laberinto en la parte superior del Protector para minimizar la entrada de gas en la bolsa. El uso adecuado y la implementación del procedimiento de purga mencionado anteriormente se vuelven aún más importantes en estas situaciones.

1.4.5 Desviación / orientación. Para el funcionamiento a desviaciones > 45 grados, no se recomienda el uso de cámaras de laberinto, y las cámaras de sellado positivo deben proporcionar un mejor servicio.

1.4.6 Tratamientos Químicos. El tratamiento de los químicos debe analizarse primero para determinar la compatibilidad con los elastómeros. Los disolventes aromáticos duros tales como el xileno pueden ser muy eficaces en la disolución de asfáltenos, pero también se sabe que son perjudiciales para los elastómeros.

La concentración de los productos químicos de tratamiento ingredientes activos y los tiempos de exposición son factores a considerar

¹² Ibid., p. 169

Cuando otras condiciones operativas o ambientales lo permitan, puede ser mejor colocar una cámara de laberinto en el extremo de la cabeza del protector para proporcionar un cierto aislamiento entre las bolsas y los productos químicos de tratamiento. Los signos de ataque químico pueden incluir endurecimiento del material. De los elastómeros utilizados en Protectores, se cree generalmente que AFLAS proporciona una mejor resistencia a la degradación del material.¹³

1.4.7 Presión. La presión en sí misma no es generalmente perjudicial para el protector o su funcionamiento. Los elastómeros tales como bolsas protectoras que se eliminan demasiado rápidamente de un entorno de alta presión pueden resultar dañados por "descompresión explosiva". Esto ocurre cuando los gases que han permeado el elastómero durante el funcionamiento no se les da tiempo suficiente para salir del material mientras que el sistema BES está siendo extraído del pozo. A medida que el sistema BES se acerca a la superficie, la presión que la rodea disminuye de manera¹⁴

1.5 CABLE

Cualquier condición o práctica que resulte en un deterioro o falla del cable afectará negativamente al sistema BES. Si el sistema BES está equipado con un sensor de pozo, el deterioro del cable puede afectar la capacidad del sensor para transmitir datos. Los daños más graves como los cortos de fase o fase-tierra, pueden impedir que la electricidad llegue a los devanados del motor, inutilizando el sistema BES. La selección adecuada de los productos de cable para el entorno operativo y el manejo de estos productos durante las operaciones de instalación y extracción es fundamental para la vida útil del sistema del cable, así como para el éxito general de la instalación BES.

¹³ Schlumberger. Artificial lift Application Engineering Reference Manual. 2008, Ver. A, sec 6, p. 171

¹⁴ Ibid., p. 176

Cuando se ha ajustado correctamente al entorno operativo y se ha manipulado con cuidado, puede proporcionar años de servicio y, a menudo, puede estar apto para ser reutilizado, aunque otros componentes mecánicos del sistema BES pueden haber fallado.

1.5.1 Causas y condiciones que generan daños al cable. A continuación, se presentan diversas condiciones que pueden generar daños al cable a lo largo de su vida útil.

1.5.2 Manipulación. Las malas prácticas de manipulación y los equipos defectuosos son la principal causa de daños en el cable, y fácilmente los más prevenibles.

1.5.3 Empaques de suspensión de tuberías. Los empaques de compresión mal preparados pueden provocar daños mecánicos en el cable de alimentación y fallas. Un paquete de compresión utiliza anillos de empaque de caucho que cuando se comprime crea un sello contra los conductores del cable de alimentación o la camisa y también entre la percha del tubo y la cabeza de la tubería en la que se encuentra la percha del tubo o sello.¹⁵

1.5.4 Alta temperatura. Si somete un cable de alimentación a temperaturas superiores a su capacidad, se producirá degradación y falla prematura.

Las clasificaciones de temperatura del cable de alimentación se basan en la temperatura del conductor. Si la temperatura del conductor proyectado está cerca de la clasificación del cable de alimentación, siempre es mejor instalar un cable con una clasificación de temperatura que exceda la temperatura del conductor proyectada por un margen claro

¹⁵ Schlumberger. Artificial lift Application Engineering Reference Manual. 2008, Ver. A, sec 7, p. 190

1.5.5 Cantidad de Gas. Si los volúmenes de gas con respecto a los volúmenes de líquido son altos, generalmente es mejor usar un cable de alimentación que incluya una cubierta de barrera de cables.

El cable que se ha utilizado en un ambiente gaseoso también puede ser difícil de reacondicionar, ya que el gas que ha penetrado en la camisa y está presente entre la cubierta y el aislamiento del conductor hará que la cubierta se hinche hacia afuera si se intenta reacondicionar antes de que el gas pueda desahogarse. Esto también puede indicar que la chaqueta ha sido dañada en algún lugar a lo largo del cable. La descompresión explosiva puede ocurrir cuando el sistema ESP se extrae de un área de alta presión a un área de presión inferior cuando se aproxima a la superficie. Los gases que han permeado la cubierta del cable o el aislamiento intentan moverse a través del material y escapar al área de menor presión. Si no hay suficiente tiempo para que esto ocurra o la reducción de presión ocurra demasiado rápido los gases formarán ampollas o romper el material. Los daños causados por la descompresión pueden dificultar el proceso general de análisis del fallo del cable.¹⁶

1.5.6 Corrosión y H₂S. La corrosión puede ser muy destructiva para el cable de alimentación. Afortunadamente hay varias características disponibles para mitigar los efectos de la corrosión.

Para prevenir eficazmente la corrosión o para obtener la mejor vida útil, primero es necesario comprender la naturaleza de la corrosión y por qué está ocurriendo para que las mejores elecciones puedan hacerse con respecto a la selección del cable de alimentación. Uno de los agentes corrosivos más agresivos es el H₂S. Como es una molécula muy pequeña, penetra fácilmente en la mayoría de los materiales y si el cable de alimentación no incluye una cubierta de barrera de plomo, comenzará a corroer el material conductor de cobre.¹⁷

¹⁶ Schlumberger. Artificial lift Application Engineering Reference Manual. 2008, Ver. A, sec 7, p. 186

¹⁷ Schlumberger. Artificial lift Application Engineering Reference Manual. 2008, Ver. A, sec 6, p. 125

1.5.7 Productos químicos. Algunos productos químicos de tratamiento pueden ser dañinos para los materiales utilizados para fabricar cables. Los disolventes aromáticos tales como el xileno pueden causar degradación a los elastómeros, aunque este material es muy eficaz para disolver asfaltenos que podrían tapan la bomba o bloquear el dispositivo de admisión. Los ácidos inhibidos a concentraciones no superiores al 15% pueden ser muy eficaces en la disolución de las escamas y no deben causar corrosión de la armadura si se hace circular y se devuelve desde el pozo. El uso de concentraciones más fuertes y tiempos de exposición más largos puede dañar la armadura del cable de alimentación. Como la armadura es la primera línea de defensa del cable de alimentación contra los daños mecánicos, se debe tener cuidado al considerar un trabajo ácido y sus posibles efectos adversos sobre la armadura.

2 PROCESO DE INVESTIGACION DE LA FALLA DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE

La vida útil del sistema de bombeo electrosumergible BES es un indicador de rendimiento clave; Por lo tanto, es muy importante investigar cada falla del sistema para determinar su causa raíz y llevar a cabo las acciones correctivas adecuadas a su debido tiempo con el fin de aumentar la vida útil de las subsiguientes instalaciones. Debido a condiciones de operación no ideales, hay muchos desafíos que deben ser superados para aumentar la vida útil de sistema de bombeo electrosumergible y disminuir el número de fallas. Algunos de estos desafíos son:

- Entorno agresivo como alto contenido de sólidos, deposiciones de sal y parafina, altas temperaturas, alto contenido de gas.
- Casings viejos, deteriorados o dañados.
- Errores humanos por falta de experiencia, conocimiento y responsabilidad.

Algunos de estos problemas, sin duda pueden ser resueltos, el resto pueden ser mitigados. La determinación de la causa raíz del fallo requiere una documentación detallada de los eventos y un proceso de investigación bien organizado. Este proceso puede tomar una cantidad considerable de esfuerzos, así como el tiempo invertido.

2.1 CICLO DE CONTINUO MEJORAMIENTO

Lamentablemente el sistema de bombeo electrosumergible no puede operar eternamente. Tarde o temprano falla proporcionando una valiosa fuente de conocimiento. Aprender de los fracasos no es un concepto nuevo; Pero no siempre se utiliza plenamente para la mejora continua. Un error común es la interrupción de la investigación antes de determinar la causa raíz. El cuadro que se presenta a continuación ilustra el ciclo de mejoramiento continuo que está garantizado por la eficaz Investigación de Fallas. Debe aplicarse a cada ESP fallido.

El ciclo comienza con el sistema. En este contexto, el término "sistema" significa el complejo de cosas tales como personas, recursos, procesos de trabajo, información, etc. Normalmente, el sistema produce productos útiles. Pero las imperfecciones (por ejemplo, falta de recursos, procedimientos, personas, etc.) afectan a otros componentes del sistema que conducen al siguiente componente de este ciclo.

El siguiente componente del ciclo es falla del sistema de bombeo electrosumergible que es un resultado negativo del sistema, como salida no deseada de las imperfecciones del sistema.

Durante la investigación de la falla, en la mayoría de los casos se descubren múltiples circunstancias negativas; cada uno de ellos puede ser causa potencial de falla de equipo. Por lo tanto, los esfuerzos deben dirigirse a la determinación de la causalidad estructural. Cada rama debe ser evaluada por separado, esto evitará

que el equipo de investigación pase por alto datos importantes y hacer conclusiones precipitadas.

El siguiente componente es causa raíz. Muchas fuentes dicen que es casi imposible seleccionar la causa de la raíz única entre los factores que contribuyen. Por lo tanto, para aclarar la terminología "causa raíz" en este contexto es la causa que domina sobre todos los demás factores que contribuyen y que la eliminación en este caso específico evitaría el fracaso del sistema de bombeo electrosumergible.

Ilustración 1. Ciclo de continuo mejoramiento



Fuente: Tomado y modificado de Schlumberger. Dismantle, Inspection, and Failure Analysis (DIFA) Reference Manual for REDA Electric Submersible Pumping Systems. 2008

Por lo general, el trabajo del equipo de investigación se completa con la presentación de un informe de investigación de Falla que incluye escenarios de fallas y recomendaciones. La implementación de las acciones correctivas es una parte integral muy importante del ciclo de mejoramiento continuo. El seguimiento de todas las recomendaciones hechas por el equipo de investigación debe ser monitoreado, ya que en la mayoría de los casos es una manera de prevenir que vuelva a ocurrir una falla del sistema BES.

2.2 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

La recolección de datos es la parte más importante del proceso de investigación. La calidad de la información recopilada tiene un profundo efecto en las conclusiones obtenidas durante la investigación de fallas. Para la investigación de falla del sistema de bombeo electrosumergible cada período de vida proporciona información que posteriormente se analizará para la determinación de la causa raíz.

Pre-falla:

- Selección de equipos
- Preparación del equipo
- Instalación, funcionamiento y puesta en marcha del sistema BES
- Supervisión del funcionamiento del sistema BES

Post-falla:

- Confirmación de la falla BES
- Extracción de BES
- Desmantelamiento del equipo

2.3 ANÁLISIS DE FALLA

Para el análisis eficaz de la causa raíz se deben seguir algunos de sus principios fundamentales:

- Implementar un sistema de mejora de las causas es más eficaz que tratar los síntomas de un problema.
- Realizar sistemáticamente el análisis de la causa raíz, con conclusiones y causas documentadas.
- Identificar la estructura de causalidad de la falla, el análisis debe establecer todas las relaciones causales conocidas entre la causa raíz y el problema.

- Identificar qué causa si se logra eliminar, se evitará el fracaso, esto llevara a encontrar la causa raíz de la falla.
- Apoyar la causa raíz con evidencia.
- Seleccionar una solución (o soluciones) a aplicar.
- Desarrollar recomendaciones.
- Supervisar la implementación de las recomendaciones.

2.3.1 Técnicas para el análisis de causa raíz. Existe una gran cantidad de técnicas de análisis de causa raíz que pueden utilizarse para determinar la causa de la raíz del fallo. A continuación, se enumeran algunas utilizadas en Schlumberger:

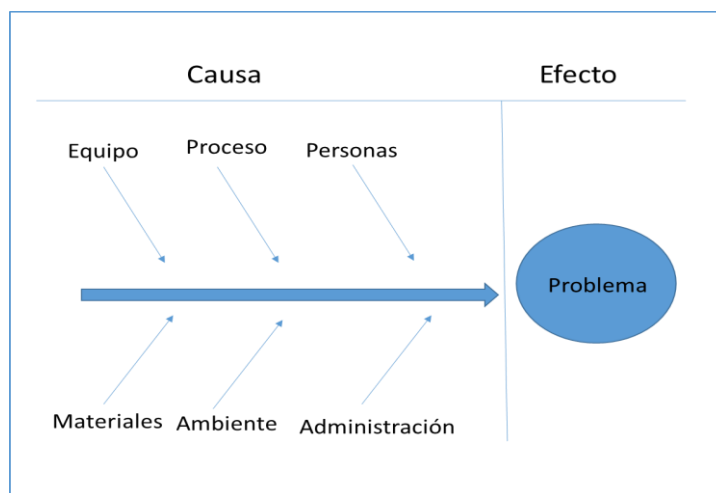
2.3.2 Diagramas de causa y efecto. Diagramas de causa y efecto o también conocido como diagrama de pescado ya que un diagrama completo puede parecerse al esqueleto de un pez. Los diagramas de causa y efecto ayudan a pensar a fondo las causas de un problema. Su principal beneficio es que empujan al equipo de investigación a considerar todas las posibles causas del problema, en lugar de las más obvias. La herramienta combina la lluvia de ideas con el uso de un tipo de mapa conceptual. Se deben seguir los siguientes pasos para resolver un problema con un diagrama de causa y efecto:

- Identificar el problema: Se debe escribir el problema exacto que investiga. Donde sea apropiado identificar quién está involucrado, cuál es el problema, cuándo y dónde ocurre. A continuación, se debe escribir el problema en un cuadro en el lado derecho de una gran hoja de papel y dibujar una línea a través del papel horizontalmente del cuadro. Este arreglo, que parece la cabeza y la espina dorsal de un pez, le da espacio para desarrollar ideas.
- Elaborar los principales factores involucrados. A continuación, se debe identificar los factores que pueden contribuir al problema y dibujar líneas de la

columna vertebral para cada factor, y etiquetarlo. Éstos pueden ser personas involucradas en el problema, sistemas, equipos, materiales, fuerzas externas, etc.

- Identificar las posibles causas para cada uno de los factores que consideró en la etapa anterior, una lluvia de ideas posibles causas del problema que puede estar relacionado con el factor. Estos factores se pueden mostrar como líneas más pequeñas que salen de los "huesos" del pescado. Cuando una causa es grande o compleja, entonces puede ser mejor dividirlo en sub-causas.

Ilustración 2. Diagrama de causa y efecto



Fuente: Tomado y modificado de Schlumberger. Dismantle, Inspection, and Failure Analysis (DIFA) Reference Manual for REDA Electric Submersible Pumping Systems. 2008

2.3.3 Análisis del árbol de fallas. En la técnica conocida como " Análisis del árbol de fallas", un efecto no deseado se toma como la raíz ("evento superior") de un árbol de la lógica. Debería haber solo un evento superior y todas las preocupaciones deben armarse de él. Entonces, cada situación que podría causar ese efecto se agrega al árbol como una serie de expresiones lógicas.

Se pueden utilizar muchos enfoques diferentes para modelarlo, pero la forma más común y popular puede resumirse en unos pocos pasos. El análisis de Árbol de análisis fallas involucra cinco pasos:

- Definir el evento no deseado: los eventos no deseados se usan entonces para hacer el Árbol de análisis fallas
- Obtener una comprensión del: una vez seleccionado el suceso indeseado, se estudiarán y analizarán todas las causas con probabilidades de afectar al suceso no deseado. Para el evento seleccionado, todas las causas se ordenan en el orden de aparición y luego se usan para el siguiente paso que está construyendo el árbol.
- Construir el árbol de fallas: después de seleccionar el evento no deseado y de haber analizado el sistema para conocer todos los efectos causantes (y si es posible sus probabilidades) se puede ahora construir el árbol de fallas.
- Evaluar el árbol de fallas: una vez que el árbol de fallas ha sido construido para un evento no deseado específico, se evalúa y analiza cualquier posible mejora. Este paso es como una introducción para el paso final que será mejorar el sistema vía acciones correctivas recomendadas.
- Recomendar acciones correctivas: este paso es muy específico, pero el punto principal siempre será que después de identificar la causa raíz todos los métodos posibles se persiguen para disminuir la probabilidad de ocurrencia.

2.4 CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

La conclusión debe contener la causa de la falla. Se debe describir el escenario de falla utilizando los datos mencionados anteriormente. Antes de escribir la conclusión, el único escenario de falla tiene que ser determinado, en caso de que

aparecieran varias teorías, se debe encontrar más datos con el fin de probar una de ellas y refutar el resto. La conclusión debe tener sólo una versión; No deben dejarse espacios para dudas. Las recomendaciones son el espacio para mejorar el funcionamiento del pozo. Si la cadena de causalidad se construyó correctamente, se sabe qué debe ser mejorado o corregido.

Las medidas correctivas deben subdividirse en, acciones correctivas que tienen como objetivo prevenir la recurrencia de la falla y aplicarse a determinada causa raíz de la falla y acciones preventivas que tienen como objetivo prevenir la ocurrencia de la falla y aplicarse a causas potenciales descubiertas durante la investigación.

2.5 ANÁLISIS DE FALLA PARA 3 POZOS UBICADOS EN LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES

Este trabajo se desarrolla bajo políticas de confidencialidad Schlumberger y no es posible revelar el nombre de los pozos a estudiar. Por lo que desde ahora los nombraremos como pozo 1, pozo 2 y pozo 3.

2.5.1 Análisis de falla para el pozo 1. En el pozo 1, se han realizado tres instalaciones por parte de Schlumberger.

El servicio de run #1 se ejecutó el 24 de mayo de 2012 y el día 28 de octubre de 2014 se realizó la extracción de equipo completando un run Life total de 887 días. El servicio de run #2 se ejecutó el 3 de noviembre de 2014 y el día 22 de junio de 2016 se realizó la extracción de equipo completando un run life total de 246 días. Finalmente, el servicio de run #3 se ejecutó el 6 de julio de 2016 y el 15 de mayo de 2017 se realizó la extracción de equipo completando un run life total de 115 días.

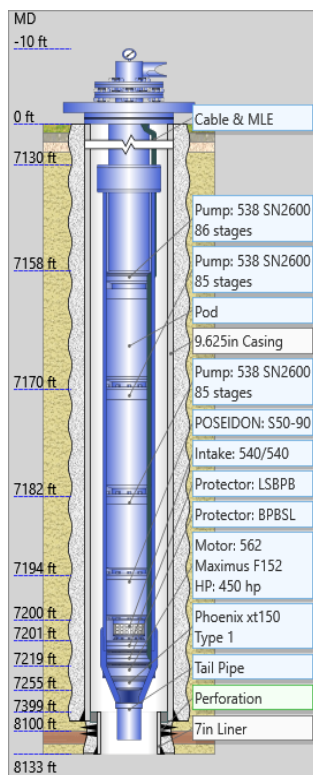
Tabla 1. Historia de instalaciones BES en el pozo 1

Equipo	Fecha instalación	Fecha de pull	Run life	Razón del pull
BES	24-May-12	28-Oct-14	887	Pérdida de producción
BES	3-Nov-14	22-Jun-16	246	Pérdida de producción
BES	6-Jul-16	15-May-17	115	Falla mecánica

Fuente: Tomado y modificado de Schlumberger. Illumina. Software para el almacenamiento de información de Artificial Lift. 2008

2.5.2 Sistema BES instalado en el pozo 1

Ilustración 3. Descripción del equipo instalado en el pozo 1

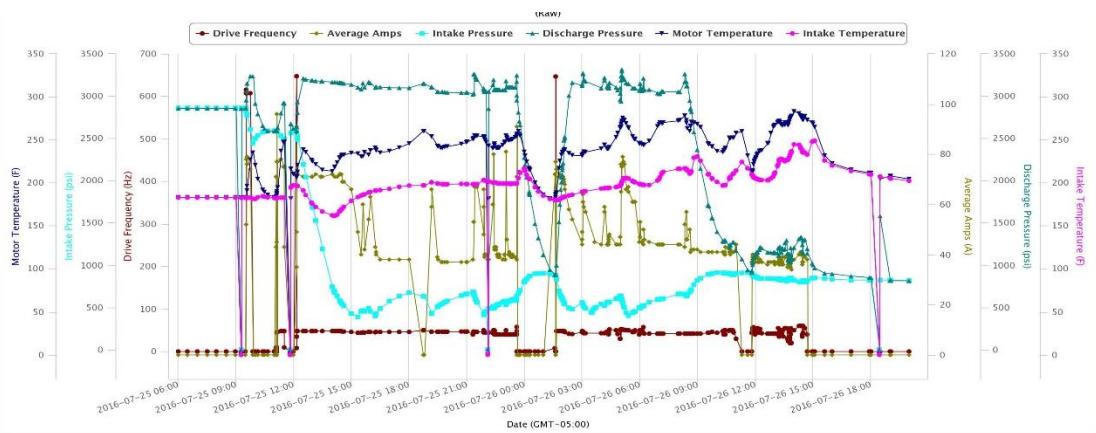


Equipo	Equipo instalado
Bomba Superior	PUMP: SN2600 86 etapas
Bomba Center	PUMP: SN2600 85 etapas
Bomba Inferior	PUMP: SN2600 85 etapas
Manejador de gas	S50-90
Intake	INTAKE: BOI
Sello Superior	LSBPB
Sello Inferior	LSBPB
Motor	F152, MAXIMUS
Sensor	BASE GAUGE: XT150 TYPE 1

Fuente: Tomado y modificado de Schlumberger. DesingnPro versión 9. Software para el diseño de quipos de bombeo electrosumergible. 2016

2.5.3 Eventos del sensor. El día 25 de Julio, 2016, se arranca el pozo en simultáneo con el pozo vecino al cual nombraremos pozo 2; se evidencia una caída drástica en la presión de entrada desde una estática alrededor de 2559 psi a casi 450 psi con una frecuencia inicial de 45 Hz, inmediatamente se presenta inestabilidad operativa y se realizan diferentes maniobras en la frecuencia de operación para tratar de estabilizar el sistema, sin obtener éxitos.

Ilustración 4. Datos del sensor del 25-Jul-16 al 26-Jul-16



Fuente: Tomado y modificado de Schlumberger. Zediaccess. Plataforma especializada en manejo de producción y operaciones.

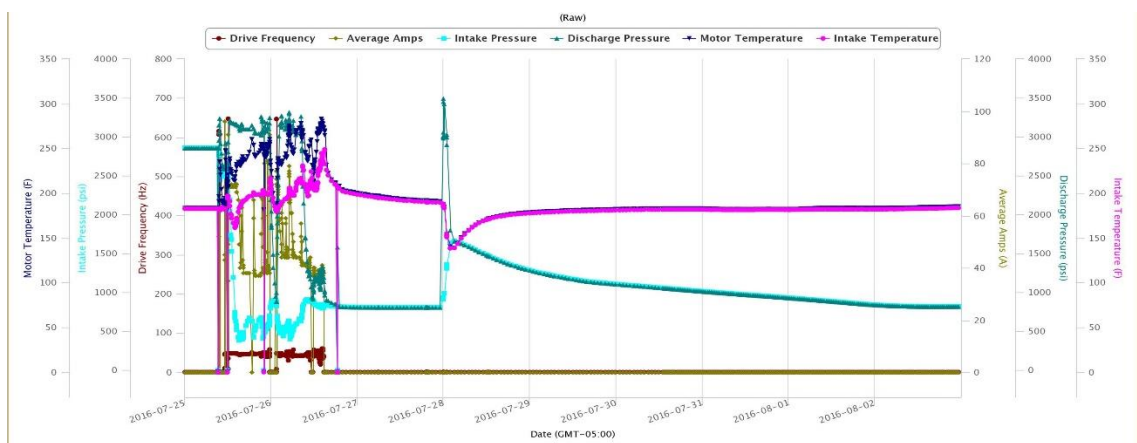
Julio 25, 2016, cerca de la media noche se apaga el pozo por casi dos horas, la presión de entrada, solo se reestablece hasta 897 psi.

Julio 26, 2016. Aproximadamente a las 01: 30 am se arranca el equipo BES a una frecuencia de 48 Hz, PIP de 479 psi y una presión de Descarga de 3100 psi, el sistema se mantuvo inestable, se realizan incrementos de frecuencia progresivo hasta 52 Hz, alcanzando algunos picos de corriente de operación en valores hasta un máximo de 76 Amp @ 50.3 Hz (menor a la corriente de placa de motor).

Luego de casi 7 horas operativas, se evidenció un decremento progresivo en la presión de descarga y a su vez la presión de entrada incrementó; hasta que las mismas se igualaron, manteniendo una frecuencia de operación, la corriente de operación evidencia una reducción progresiva de casi 10 Amp promedio.

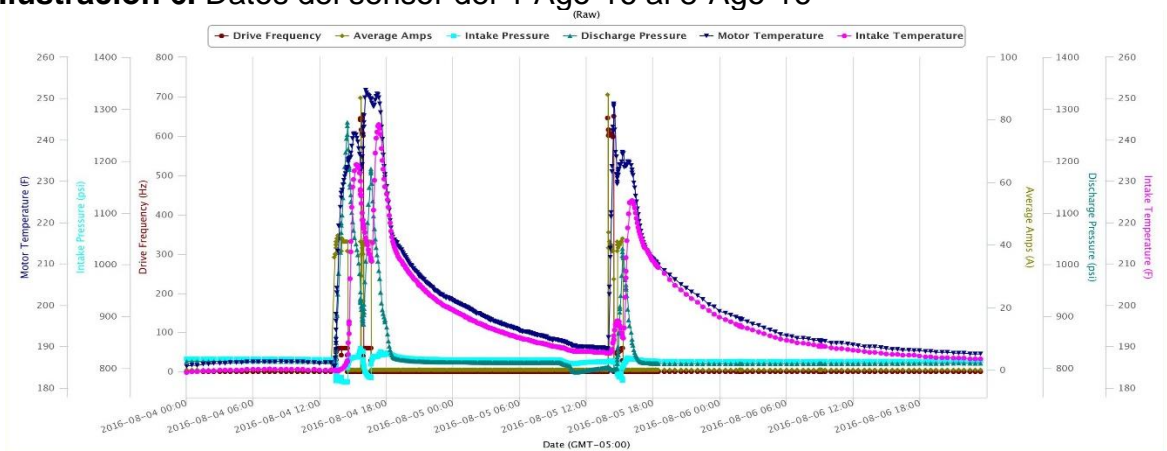
Julio 26, 2016. 11: 07 am se realiza una parada del sistema BES para evaluar un posterior arranque, este se realiza 1 hora después en rampa progresiva, no se obtienen incrementos en la presión de descarga incluso con frecuencia entre 55 y 60 Hz. El equipo de bombeo electrosumergible queda parado para evaluación posterior.

Ilustración 5. Datos del sensor del 25-Jul-16 al 2-Ago-16



Fuente: Tomado y modificado de Schlumberger. Zediaccs. Plataforma especializada en manejo de producción y operaciones

Ilustración 6. Datos del sensor del 4-Ago-16 al 8-Ago-16



Fuente: Tomado y modificado de Schlumberger. Zediaccs. Plataforma especializada en manejo de producción y operaciones

Durante los días 04 y 05 de agosto 2016, se realizan arranques al sistema BES a frecuencia de hasta 60 Hz sin tener aporte en superficie. Durante las pruebas, la máxima presión de descarga alcanzada fue de 1247 Psi, es decir, no se crea un diferencial de presión lo suficientemente grande para alcanzar el levantamiento requerido.

2.5.4 Observaciones durante el desmantelamiento del equipo

Tabla 2. Equipo inspeccionado

Equipo	Equipo inspeccionado	Comentarios
Bomba Superior	PUMP: SN2600 86 etapas	Bomba con giro restringido desgaste ligero sobre componentes eje con evidencias de sobrecalentamiento.
Bomba Center	PUMP: SN2600 85 etapas	Bomba con giro restringido desgaste ligero sobre componentes.
Bomba Inferior	PUMP: SN2600 85 etapas	Ruptura de eje en bomba inferior no hay presencia considerable de sólidos, evidencia de altas temperaturas sobre eje.
Manejador de gas	S50-90	Manejador en buen estado cojinetes de estabilización con desgaste ligero.
Intake	INTAKE: BOI	Cojinetes de estabilización en buen estado.
Sello Superior	LSBPB	Contaminación cámara laberinto con presencia de asfáltenos y sedimentos bolsas ok, cojinetes de estabilización ok.
Sello Inferior	LSBPB	aceite limpio en todas las cámaras, cojinetes de empuje con desgaste leve, cojinetes de estabilización ok
Motor	F152, MAXIMUS	el motor se encontró en buen estado eléctrico y mecánico con aceite limpio al interior
Sensor	BASE GAUGE: XT150 TYPE 1	sensor operativo

Ver registro fotográfico completo del desmantelamiento del equipo en anexo B.

- Bomba superior: El housing se encuentra sin pérdida de material relacionado a arrastre o corrosión. Eje con giro restringido y sin desplazamiento axial, medidas de eje en base y cabeza por fuera de tolerancias. El eje se encontró con marcas de coloración indicando presencia de altas temperaturas durante la operación. No se registra presencia de material foráneo en el interior. Los componentes de estabilización radial en base y cabeza presentaron desgaste ligero en su superficie de fricción. Los impulsores presentaron desgaste ligero en las superficies de estabilización radial principalmente en empuje descendente. Los O'ring Aflas de las juntas presentaron algunas deformaciones lo cual indica también recalentamiento de los elementos durante su operación.
- Bomba central: La bomba presento giro restringido. No se encontraron evidencias de deformación plástica o desgaste en el eje. Etapas con desgaste leve, los cojinetes de estabilización cerámica en zirconio se encontraron en buenas condiciones, los impulsores presentaron desgaste leve al igual que los difusores.
- Bomba inferior: El housing no presento perdida de material relacionado a arrastre o corrosión, el eje presento ruptura cerca a la base de la bomba; sobre la superficie de ruptura se evidencio marcas de alta temperatura. Los impulsores presentaron desgaste leve sobre su superficie al igual que los difusores. Los bujes de estabilización cerámica en base, cabeza y etapas ARZ se encontraron con desgaste radial leve sobre su superficie, se encontró leve presencia de solidos al interior de la bomba.
- Protector superior: El housing sin evidencia de arrastre o corrosión sobre su superficie. Al interior de la cámara laberinto se encontró fluido de pozo, con presencia de material con apariencia de asfáltenos y en el exterior de las bolsas. Ambos sellos mecánicos se encontraron operativos, sin discontinuidad física o deformación de los elastómeros. Las bolsas se encontraron en buen estado y con

aceite limpio al interior de las mismas. Se encontró desgaste ligero en los elementos de empuje.

- Protector inferior: Housing sin marcas longitudinales o pérdida de material. Los cojinetes de empuje registraron tan solo desgaste ligero en las interfaces de fricción, con leves marcas de temperatura. Al interior de las cámaras laberinto y bolsas se encontró aceite limpio; el eje se encontraba en condiciones operacionales, sin desgaste ni deformación plástica. Los o'ring se encontraron levemente deformados por acción de temperatura.
- Motor: En el interior contenía aceite de motor claro y limpio, el housing no presento evidencia de arrastre o corrosión. Eléctricamente presentó fases balanceadas 0,7- 0.7- 0.7 Ohms y con aislamiento de 26 GΩ. MLE en buenas condiciones sin pérdida de material sobre la armadura. Cojinete de empuje axial con desgaste ligero sobre la superficie de fricción. Conjunto de rotores en buenas condiciones mecánicas sin desgaste radial considerable, sobre la superficie de los rotores se evidencio coloración con muestras de alta temperatura

Ilustración 7. Ruptura del eje y etapa cercana al área de la fractura



2.5.5 Causa de la falla. La falla mecánica traducida en la rotura de eje en la bomba del sistema de bombeo electrosumergible del pozo 1, obedece a una condición inestable de operación, característico de alto contenido de gas y bajo aporte del pozo. Dicha condición genera un incremento en la temperatura y alto empuje descendente en los componentes del sistema, ocasionando degradación en algunos elementos como son los cojinetes cerámicos de estabilización en las bombas, hasta desacoplar el bushing de la cavidad del difusor; incrementando así, el desgaste de los bujes y afectando el eje.

2.5.6 Conclusión. La bomba fue diseñada para trabajar bajo rangos de producción entre 1200 y 480 BFPD a nivel de la bomba, pero en los perfiles de temperatura se evidencia que las tasas fueron mucho más bajas que las mencionadas anteriormente, lo que indica que la bomba trabajó con baja sumergencia. Durante el periodo operativo del sistema de bombeo, no se tuvo nunca una condición estable de operación, debido a continuos eventos de bloqueo por gas. Posteriormente se presenta una pérdida de flujo, condición que ocasionó un incremento en la temperatura de los componentes del sistema, afectando principalmente los cojinetes cerámicos de la bomba, finalizando en una fractura de eje.

2.5.7 Recomendaciones

- Se recomienda verificar para futuras instalaciones el daño de formación del pozo ya que como se evidencio durante la operación, el aporte es más bajo del esperado.
- Se recomienda hacer medición de la producción de gas del pozo en sitio, para poder evaluar la condición de operación real del sistema BES y así minimizar los bloqueos por eventos de gas asociados.
- Utilizar bombas que contengan bushing con dispositivo anti rotación para evitar que bajo condiciones de alta temperatura los oring puedan ceder y termine afectando los ejes por perdida de estabilización radial.

- Mantener la evaluación de las presiones de yacimiento y temperatura de pozo a través de la señal del sensor de fondo, en especial cuando se realizan maniobras en pozos vecinos, ya que la interacción que tengan los mismos podrían afectar las condiciones operativas en determinados momentos.
- Evaluar la mayor cantidad de escenarios posibles durante la etapa de diseño como IP, GOR, viscosidades para poder determinar los límites de operación del equipo a instalar.

2.6 Análisis de falla para el pozo 2. Componente fallado: El equipo BES fue retirado de fondo por una falla eléctrica localizada en el MLE, el cual tenía una sobretensión sobre la cabeza de conexión que propicio un arco eléctrico en la fase B del MLE. Ver registro fotográfico completo del desmantelamiento del equipo en anexo B y la información del equipo completa en el anexo C.

Ilustración 8. Elongación y discontinuidad de coraza, marcas de alta temperatura



2.6.1 Causa de la falla. La falla inicial del equipo obedece a la fractura del eje en la bomba inferior, la cual es consecuencia de la pérdida de estabilización. Esta pérdida de estabilización es producto de bloqueos por gas y por ende baja refrigeración en el sistema que promueve degradación de los compliant o'ring y como consecuencia el desprendimiento del bushing.

Dicha condición genera recalentamiento en los elementos que causa finalmente la fractura del eje, en este caso en el extremo inferior de la bomba lower. El peor de los casos indicaba que el mínimo caudal podía ser 500 bpd, de acuerdo al match se aprecia un Q de 135 bpd aprox con una eficiencia de la bomba de 5%, lo que genera una baja refrigeración del sistema.

Posteriormente se produce una falla eléctrica, la cual está asociada únicamente al MLE, el cual estuvo expuesto a una sobretensión que permitió que los compuestos de protección eléctrica y mecánica cedieran hasta permitir la exposición y entrada de fluido de pozo hasta los conductores. El equipo se encontraba detenido desde el día 31 octubre 2016, el cual presento parada por sobre corriente y alta temperatura del intake y motor, también se observó que el equipo presento altas vibraciones. Estas vibraciones son producto de la perdida de estabilización radial a la altura del intake y protector superior, las cuales a su vez están originadas por operación a alta temperatura por intermitencia durante la operación (bajo flujo y gas) que ocasiona el desprendimiento de los bushing (cojinete estático).

Las vibraciones de alta amplitud crean movimientos erráticos en el sistema, lo cual puede generar que los tornillos de sujeción de la camisa de refrigeración se suelten y a su vez de permita la rotación de la camisa, la cual a su vez va "entorciendo a su alrededor" el MLE y creando como consecuencia una sobretensión del elemento.

2.6.2 Conclusión. La falla eléctrica del equipo se presentó puntualmente en la cabeza de conexión del MLE, por un corto a tierra, producto de una sobre tensión del componente durante la operación. El equipo ESP instalado constaba de una camisa de refrigeración del tipo invertida, con la finalidad de mejorar la separación natural de gas en ambientes de alto GOR.

Este último elemento presenta rotación durante la operación por altas vibraciones en el sistema que desprendieron los tornillos de sujeción del colgador. El equipo muestra un deterioro importante en los cojinetes de estabilización radial (intake y protector UT) por alta temperatura que ocasiona el desprendimiento de los bujes estáticos de la cavidad y posterior destrucción de estos elementos; dicha condición es la promotora de la operación bajo vibraciones de alta magnitud. Otro de los puntos importantes que contribuyó en la alta vibración es la ruptura del eje de la bomba inferior, la cual está relacionada al desprendimiento de los bujes estáticos en algunas etapas ARZ por constantes bloqueos de gas a los cuales estuvo expuesto el equipo.

2.6.3 Recomendaciones

- Mantener constante evaluación de las presiones de yacimiento y temperatura de pozo a través de la señal del sensor de fondo, en especial cuando se realizan maniobras en pozos vecinos como el Pozo 1 y el Pozo 3, ya que la interacción que tengan los mismos podrían afectar las condiciones operativas en determinados momentos.
- Se recomienda hacer medición de la producción de gas del pozo en sitio, para poder evaluar la condición de operación real del sistema BES y así minimizar los bloqueos por eventos de gas asociados.
- Evaluar la mayor cantidad de escenarios posibles durante la etapa de diseños como IP, GOR, viscosidades para poder determinar los límites de operación del equipo a instalar.
- Para próximas instalaciones se recomienda utilizar etapas que contengan dispositivo anti rotación, en operaciones bajo altas temperaturas los o'ring de ajuste pueden ceder y generar fallas por desprendimiento de los mismos.

- Para próximas instalaciones es recomendable reevaluar posibles maneras de mitigar el desprendimiento de los tornillos (Adicional al torque se recomienda aplicar loctite o centro puntear los tornillos de sujeción).
- Es recomendable evaluar posibilidad de instalar Guarda cable adiabático con el fin de evitar que la temperatura pueda afectar el MLE.

2.7 Análisis de falla para el pozo 3. El MLE presenta dos de las fases con bajo aislamiento, los terminales de conexión registran leve coloración oscura. El EPDM cerca al pothead se encontraba suelto y/o degradado por temperatura y dos leves lesiones en dos de las fases. Ver registro fotográfico completo del desmantelamiento del equipo en anexo B y la información del equipo completa en el anexo C.

2.7.1 Causa de la falla. La pérdida de aislamiento del MLE se encuentra asociada a degradación del EPDM en dos de sus fases (A & B) por alta temperatura. De acuerdo a la data se evidencia que el completamiento instalado en el pozo no logró el objetivo deseado debido a que el influjo del pozo no fue suficiente para mantener llena la capsula provocando que el equipo BES trabajara sin nivel, ocasionando operación a alta temperatura, reflejado en las repetidas paradas por sobre temperatura. Adicionalmente el equipo registró varios eventos de bloqueo por gas, lo cual a su vez contribuyó también un incremento significativo de la temperatura, afectando también el aislamiento del MLE.

2.7.2 Conclusión. Las condiciones operativas indican que los pozos 1, 2 y 3 pueden presentar una comunicación entre si y afectar la estabilidad operativa de los sistemas electrosumergibles cuando los mismos están trabajando al mismo tiempo; los datos iniciales de simulación para cada diseño pueden estar viéndose afectados directamente por las condiciones reales al momento de una múltiple actividad.

Esto fue evidenciado con la operación del pozo 2, la misma fue estable y en acuerdo a los resultados de salida esperados hasta que se arrancó su pozo vecino pozo 1, la actividad del pozo 1 desestabilizó, la condición estable del pozo 2, cambiando probablemente los datos de IPR originales.

Ilustración 9. Lesión y degradación del EPDM por temperatura, terminales de conexión " Fases A & C" con coloración oscura.



Con lo observado en estas intervenciones, es recomendable evaluar el comportamiento de cada pozo de manera individual y establecer la variación (Máximas y Mínimas) en los datos de diseño que podría tener cada pozo para evaluar todos los casos posibles con la finalidad de confirmar que el sistema de levantamiento cubra el mayor rango operativo y se tenga la mayor flexibilidad posible.

La simulación contempló el movimiento de fluido a nivel de la capsula y la tubería de cola (condición teórica con datos utilizados), sin embargo, se observan limitaciones en la producción dentro de capsula que originan los incrementos de temperatura. Vale la pena resaltar que la bomba fue diseñada para rangos de producción entre 906 y 1816 BFPD a nivel de la bomba, pero se evidencio en los perfiles de temperatura que las tasas fueron mucho más bajas que las mencionadas anteriormente.

El equipo presentó condiciones inestables de operación desde el inicio de su vida operativa, presentando múltiples bloqueos por gas y variaciones de temperatura de operación a nivel del equipo BES instalado dentro de la capsula, lo cual afecto notablemente algunos de los componentes internos, en este caso en particular degradó el EPDM de dos de las fases del MLE, impidiendo que el compuesto aislara adecuadamente el sistema. Cabe resaltar que la falla no corresponde a un corto circuito sino a un bajo aislamiento.

2.7.3 Recomendaciones

- Mantener una constante evaluación de las presiones de yacimiento y temperatura de pozo a través de la señal del sensor de fondo, en especial cuando se realizan maniobras en pozos vecinos como el Pozo 1 y Pozo 2, ya que la interacción que tengan los mismos podrían afectar las condiciones operativas en determinados momentos.
- Instalar bombas con etapas que contengan dispositivos de anti rotación para los bushing, la degradación de los o ring en etapas ARZ puede generar que estos salgan de su posición y se presente fractura de los cojinetes cerámicos.
- Evaluar la posibilidad de instalar protectores advance, la alta temperatura y la presencia de fluidos viscosos y/o asfáltenos promueven el desgaste de los sellos mecánicos y permite la contaminación del sistema.
- Verificar posibilidad acoplar un BOI con dos VGSA UT para la próxima instalación.
- Es recomendable evaluar posibilidad de instalar Guarda cable adiabático con el fin de evitar que la temperatura pueda afectar el MLE.

3 DISEÑO DEL EQUIPO DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE PARA CADA CASO ESTUDIADO

El procedimiento para la realización de un diseño de un equipo de bombeo electrosumergible puede ser variable, a continuación, se presenta la metodología desarrollada en este trabajo.

- Recopilación y análisis de la información emitida por cliente: Estado mecánico del pozo, Survey, datos de diseño.
- Ingresar los datos en el software de diseño DesignPro 9.0.2
- Selección del tipo de bomba.
- Selección del motor.
- Selección del cable de potencia.
- Determinar condiciones de operación del equipo de superficie.

A continuación, se presenta la hoja de datos básicos de diseño enviada por el cliente para la realización del diseño del Pozo 1. Esta tabla ha sido modificada por el autor por motivos de seguridad de la información del cliente. Para ver las tablas de diseño para el pozo 2 y pozo 3, remitirse a anexos D.

3.1 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO EN EL SOFTWARE DESINGPRO 9.0.2

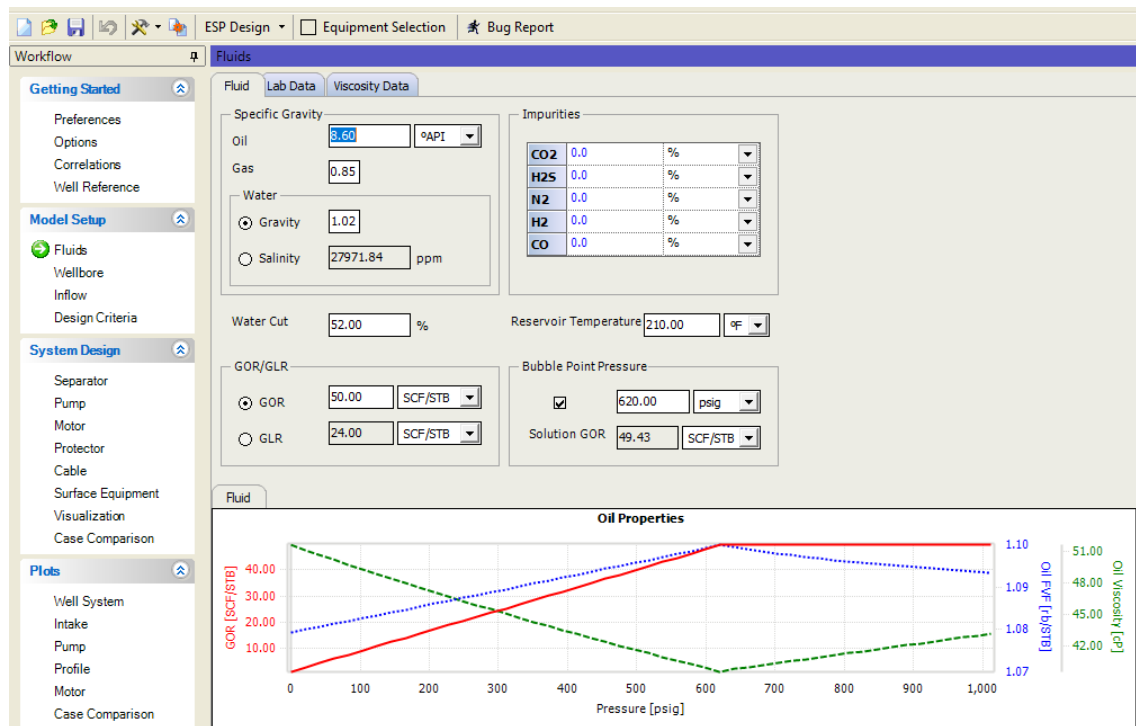
3.1.1 Propiedades de los fluidos (Fluids). En esta sección deben ser ingresados las propiedades de los fluidos que serán producidos tales como, corte de agua, gravedad específica del crudo, gravedad específica del gas y gravedad específica del agua, además la temperatura del yacimiento y la presión en el punto de burbuja que puede ser introducida directamente o puede ser calculada usando la relación basada en gas-aceite (GOR) o gas-liquido (GRL).

Tabla 3. Datos básicos de diseño

PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS					
API	8.6			viscosidad mo	Temperatura (°F)
GOR	20			9937	150
Gravedad Agua	1.02			2432	180
Gravedad Gas	0.85				
Corte de agua	52%				
Correlaciones PVT sugeridas					
Presion de Burbuja (Pb)	620				
Factor volumetrico (Bo)	1.05894				
viscosidad (mo)	227	@ 210°F			
WELLBORE					
CASING					
	MD Top (ft)	MD Botton (ft)	OD(in)	ID(in)	Weight
1	0	7399	9 5/8	8.535	53.5
2	7399	8223	7	6.276	26
TUBING					
	MD Top (ft)	MD Botton (ft)	OD(in)	ID(in)	Weight
1		7000	4 1/2	3.958	12.75
PROFUNDIDAD MEDIA DE PERFORADOS (MD):				7940 (ft)	
RELACION DE INFLUJO DEL YACIMIENTO					
Presión estática	900	psi	Indice de Productividad	0.64	BFPD/PSI
Presión de pozo fuyente	430	psi	Caudal de prueba @ Pwf	300	
Temperatura de Yacimiento	210	°F			
CONDICIONES REQUERIDAS DE DISEÑO					
		Max	Min		
Rango de caudal		300	100		
Profundidad de asentamiento MD (pies)	7000	xxxTVD		Caudal de Diseño	200
Profundidad de asentamiento actual MD (pies)	7000	xxxTVD		Presión de cabeza (psi)	140
Temperatura de Fluido en Cabeza (°F)	110			Presión de anular (psi)	140

Fuente. Cliente de la compañía Schlumberger. Modificado por el autor.

Ilustración 10. Ventana para el ingreso de propiedades de los fluidos.



Fuente: Artificial lift design and analysis software DesignPro. Property of Schlumberger. All rights reserved.

3.1.2 Estado mecánico del pozo (Wellbore). En esta sección deben ser ingresados todos los datos relacionados con el estado mecánico del pozo tales como, profundidad de asentamiento del revestimiento y a tubería de producción, los datos de desviación del pozo (survey) y el punto medio de los perforados que será utilizada por el software para realizar la gráfica de desempeño del pozo IPR. Las profundidades ingresadas debes ser las medidas (MD) y nos las profundidades verticales (TVD).

3.1.3 Inflow. En esta sección deben ser ingresados los valores de presión estática del yacimiento y el índice de productividad. El software cuenta con tres opciones para modelar la curva de afluencia del pozo.

Ilustración 11. Ventana para establecer el estado mecánico del pozo

The screenshot displays the 'Well Data' window in DesignPro. The 'Directional Survey' tab is active, showing the following data:

CASING						
	MD Top	MD Bottom	OD	ID	Roughness	Weight
	ft		in	in	in	lbm/ft
Casing	0	8223				
1	0	7399	9.625	8.535	0.00065	53.5
2	7399	8223	7	6.276	0.00065	26
3						

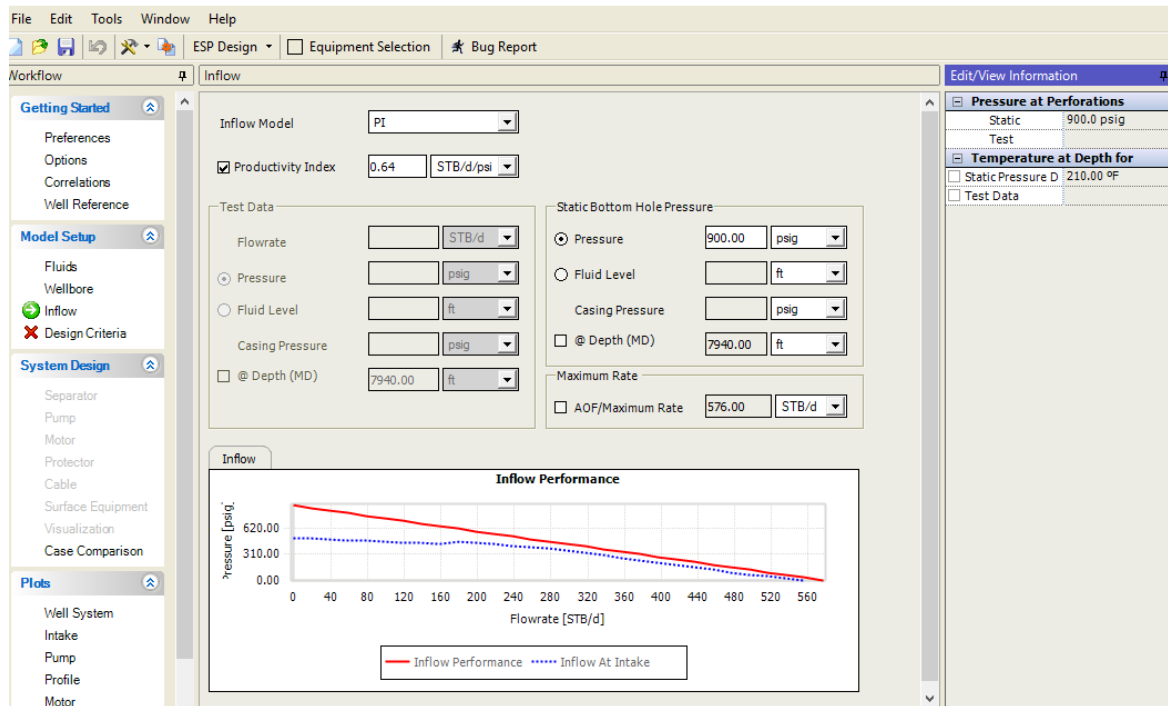
TUBING						
	MD Bottom	OD	ID	Roughness	Weight	Flow Type
	ft	in	in	in	lbm/ft	
1	7000	4.5	3.958	0.00065	12.75	TUBULAR
2						

Measured Depth		Fluid Temperature	
Packer (Optional)		Wellhead	110.00 °F
Perforations (Datum)	7940.00 ft	Reservoir	210.00 °F

Fuente: Artificial lift design and analysis software DesignPro. Property of Schlumberger. All rights reserved.

- **Método IP:** Es recomendado para pozos con baja producción de gas y alto corte de agua. En este caso, se puede introducir el valor del índice de productividad si se conoce, o se puede introducir una prueba de producción. El valor de la presión estática puede ser ingresada o el software lo calculara a partir del nivel y la densidad del fluido
- **Vogel:** Este modelo es recomendado en diseños con flujo multifásico y bajo corte de agua. Sin embargo, el software tiene la capacidad de corregir el método cuando es aplicado a pozos con alto porcentaje de agua en los fluidos producidos.
- **IPR combinado:** En este caso se usa una combinación de los dos métodos para modelar correctamente la curva de afluencia en pozos donde la presión del yacimiento es mayor a la presión de burbuja del fluido producido, pero en los perforados se tiene flujo multifásico.

Ilustración 12 Ventana para el modelamiento del desempeño del pozo

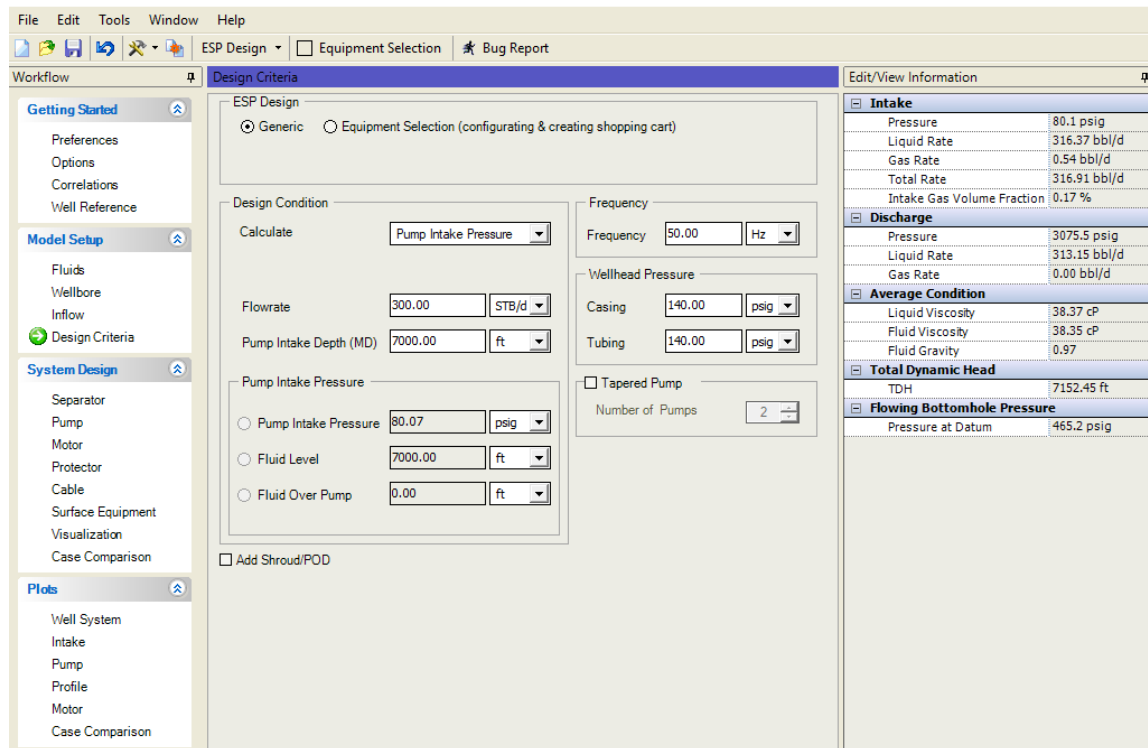


Fuente: Artificial lift design and analysis software DesignPro. Property of Schlumberger. All rights reserved.

3.1.4 Criterios de Diseño. En esta sección deben ser ingresados los valores de caudal de diseño, frecuencia a la que trabajara la bomba y presión de cabeza de pozo. El software tiene la capacidad de calcular el caudal producido, la presión de entrada de la bomba o la profundidad a la cual se deberá asentar el equipo relacionando todas estas variables entre sí, para calcular una, las otras dos deben ser ingresadas previamente.

3.1.5 Selección de la Bomba Centrífuga. En esta sección se debe elegir la bomba adecuada y el número de etapas requeridas, para ello, se cuenta con las curvas de eficiencia, donde se observa la curva de cabeza, curva de eficiencia y la curva del sistema.

Ilustración 13 Ventana para ingresar datos de diseño

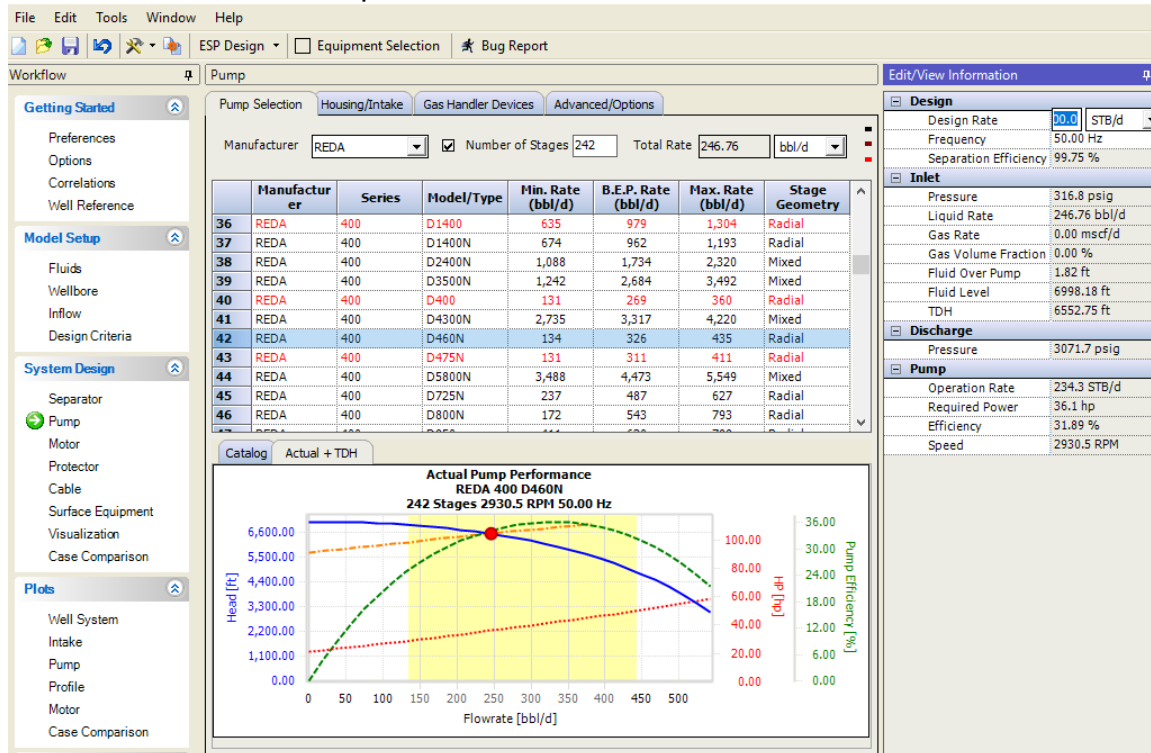


Fuente: Artificial lift design and analysis software DesignPro. Property of Schlumberger. All rights reserved.

La curva del sistema y la curva de cabeza se deben cruzar dentro de la zona amarilla en la gráfica. Si se cruzan por fuera de esta zona hacia el lado derecho, se dice que la bomba está experimentando empuje hacia arriba (upthrust), si por el contrario se cruza hacia el lado izquierdo, la bomba estaría experimentando un empuje hacia abajo (downthrust), lo cual no es recomendable ya que podría ocasionar desgaste en los impulsores limitando su vida útil. Se procede entonces a seleccionar la bomba teniendo en cuenta los materiales óptimos para las condiciones de pozo dadas.

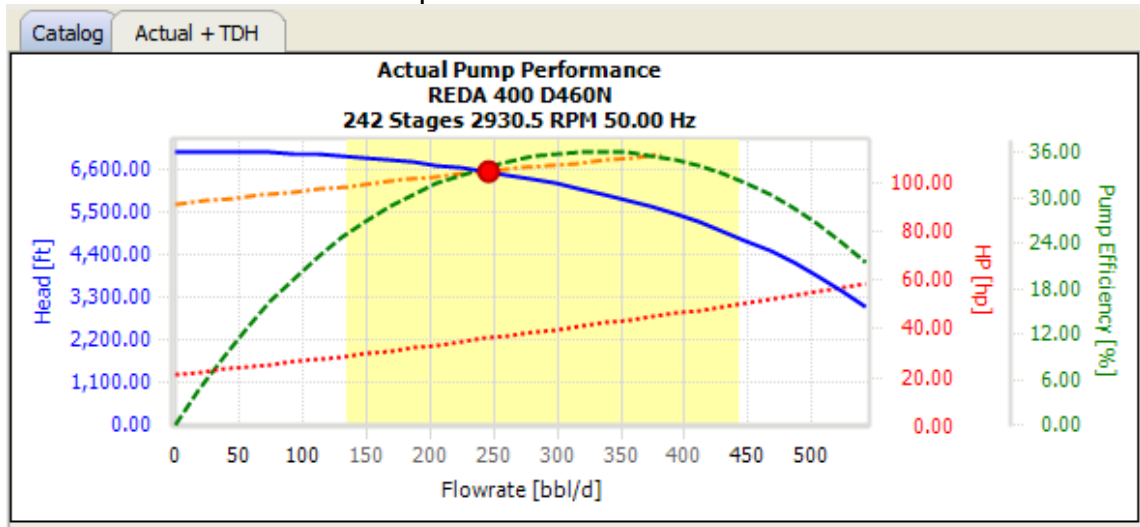
Teniendo en cuenta el caudal máximo de operación (300 bfd), se elige una bomba D460N, con 242 etapas para levantar el fluido a superficie. En la curva de desempeño de la bomba se logra apreciar que su BEP o mejor punto de eficiencia cerca de los 300 bfd, lo que representa una elección favorable para las condiciones estipuladas por el cliente.

Ilustración 14 Ventana para la selección de la bomba



Fuente: Artificial lift design and analysis software DesignPro. Property of Schlumberger. All rights reserved.

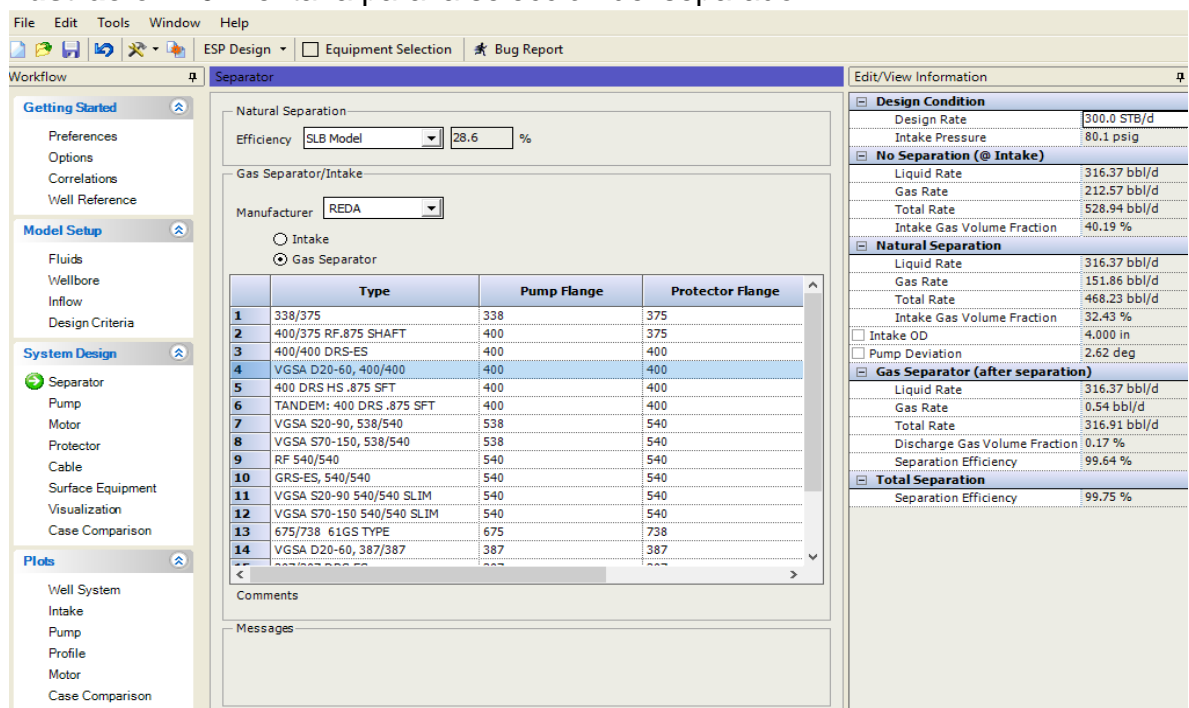
Ilustración 15 Grafica desempeño de la bomba



Fuente: Artificial lift design and analysis software DesignPro. Property of Schlumberger. All rights reserved.

3.1.6 Separador de gas. Para realizar la selección del separador de gas se debe tener en cuenta el caudal que maneja la bomba y el máximo diámetro exterior que pueda tener el equipo para que ingrese con facilidad en la tubería de revestimiento. El separador de gas es utilizado en aplicaciones donde se espera una cantidad de gas considerable, lo cual podría generar bloqueos por gas durante la vida operativa del equipo. En aplicaciones donde no se espera producción de gas, no es necesario seleccionar el separador de gas.

Ilustración 16 Ventana para la selección del separador

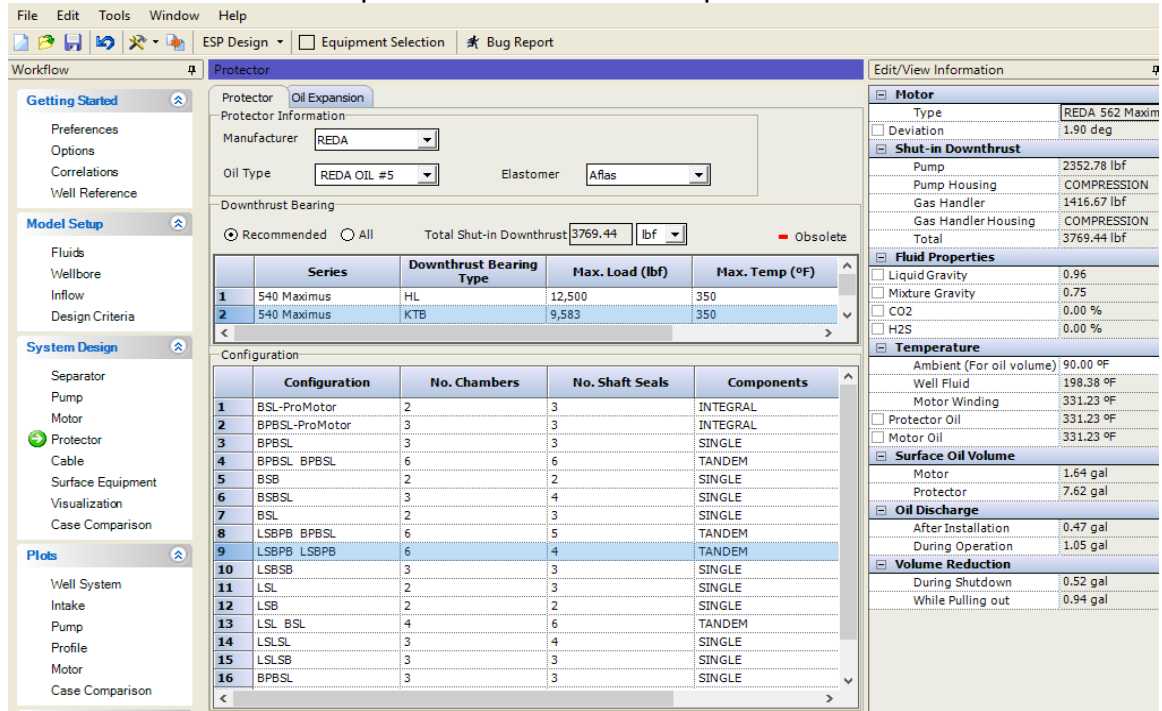


Fuente: Artificial lift design and analysis software DesignPro. Property of Schlumberger. All rights reserved.

3.1.7 Protector. Existe una gran variedad de configuraciones para elegir el protector adecuado para el motor. Para realizar la selección de los protectores se debe ubicar el laberinto debajo de la entrada de la bomba con el fin de retardar la contaminación y la entrada de solidos que afectan los sellos mecánicos que separan las bolsas inferiores.

Se seleccionan una pareja de protectores tipo LSBPB, laberinto-Sello-Bolsa-Paralelo-Bolsa y se procede a verificar el comportamiento del laberinto, así mismo el elastómero de las bolsas bajo las condiciones de operación para comprobar que no habrá daño durante la producción.

Ilustración 17 Ventana para la selección de los protectores



Fuente: Artificial lift design and analysis software DesignPro. Property of Schlumberger. All rights reserved

3.1.8 Motor. Para la selección del motor se debe tener en cuenta la potencia requerida por el equipo si este trabajara a una frecuencia de 60 Hz, este valor se puede leer en la ventana de selección del motor. Se selecciona un motor F044, el cual tiene la capacidad de suplir la potencia requerida (55.31 hp).

En aplicaciones con API muy bajos, es prudente seleccionar un motor más grande o con una capacidad de potencia por encima del requerido, para tener un backup de potencia en caso de requerirlo.

Ilustración 18 Ventana para la selección del motor

The screenshot shows the 'Motor Selection' window in DesignPro. The interface includes a menu bar (File, Edit, Tools, Window, Help), a toolbar, and a workflow pane on the left. The main area is divided into 'Motor Information', 'Operating Conditions', and a table of motor options.

Motor Information:

- Manufacturer: REDA
- Type: Variable Rating
- Series: 562 Maximus
- Rating Factor: 50 %

Operating Conditions:

- Required Power (@ 60 Hz Nameplate Frequency): 55.31 hp
- Power Controller: VSD Switchboard

Table of Motor Options:

	Series	Winding Code	Power @ 60Hz NP Freq. (hp)	Voltage @ 60Hz NP Freq. (Volts)	Current @ 60Hz NP Freq. (Amps)
18	562 Maximus	F033	56.2	1,036.4	31.9
19	562 Maximus	F035	56.2	1,227.7	27.4
20	562 Maximus	F036	56.2	1,323.8	25.3
21	562 Maximus	F037	56.2	1,897.6	17.7
22	562 Maximus	FA30	65.6	431.5	90.8
23	562 Maximus	FA31	65.6	769.5	51.0
24	562 Maximus	FA32	65.6	994.6	39.2
25	562 Maximus	FA33	65.6	1,219.7	31.9
26	562 Maximus	F041	75.0	871.8	51.0
27	562 Maximus	F042	75.0	1,127.1	39.2
28	562 Maximus	F043	75.0	1,254.4	35.4
29	562 Maximus	F044	75.0	2,019.4	22.2
30	562 Maximus	F045	75.0	2,275.7	19.4
31	562 Maximus	FA41	84.4	843.4	60.0
32	562 Maximus	FA42	84.4	987.5	51.0
33	562 Maximus	FA43	84.4	1,276.6	39.2
34	562 Maximus	FA44	84.4	1,565.7	31.9
35	562 Maximus	F050	93.8	771.3	71.4
36	562 Maximus	F057	93.8	929.7	60.0
37	562 Maximus	F051	93.8	1,089.8	51.0
38	562 Maximus	F052	93.8	1,249.0	44.7
39	562 Maximus	F053	93.8	2,046.1	27.4

Right Panel (Edit/View Information):

- Design:** Design Rate: 300.0 STB/d, Frequency: 50.00 Hz
- Pump:** Speed: 2930.5 RPM, Slip Stages: 0, No. of Stages: 242
- Motor:** Motor Speed: 2930.5 RPM, Load Factor: 73.75 %, Efficiency: 89.13 %, Current: 18.6 Amps, Voltage: 1682.9 Volts
- Operating Condition:** Operation Rate: 234.3 STB/d, TDH: 6552.75 ft, Liquid Level over Pump: 1.82 ft, Liquid Velocity: 0.07 ft/s
- Load at Design Frequency:** Pump: 36.1 hp, Separator: 2.5 hp, Gas Handler: 7.5 hp, Total: 46.1 hp

Fuente: Artificial lift design and analysis software DesignPro. Property of Schlumberger. All rights reserved.

3.2 DISEÑO DEL EQUIPO DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE PARA CADA CASO ESTUDIADO CONSIDERANDO LAS CONDICIONES QUE LLEVARON A QUE EL EQUIPO EXTRAÍDO FALLARA

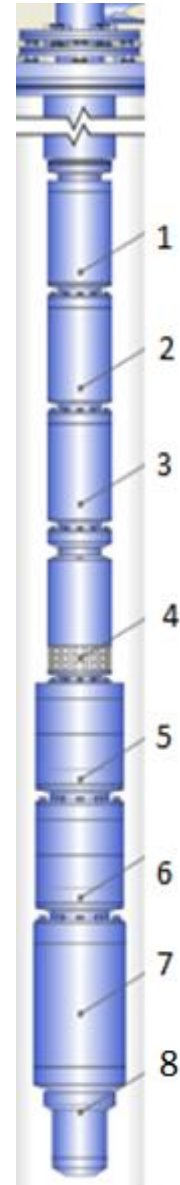
A continuación, se presenta la información técnica de las propuestas que se realizaron para los pozos seleccionados, teniendo en cuenta los datos de diseño suministrados por el cliente y el análisis de falla realizado en el capítulo anterior.

Para ver las hojas de diseño para los pozos 2 y 3, remitirse al ANEXO D.

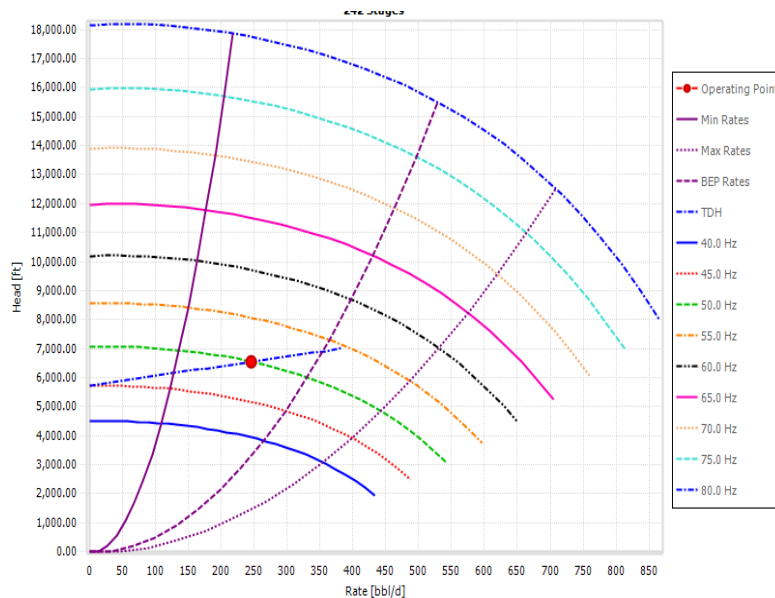
3.2.1 Diseño Pozo 1. A continuación, se presenta el diseño del equipo propuesto para el pozo 1 y posteriormente se presenta la información técnica después de correr las simulaciones realizadas en el programa DesignPro bajo las condiciones planteadas.

Ilustración 19 Equipo propuesto para el pozo 1

ITEM	DESCRIPCION
1	Bomba D460N- 137 etapas
2	Bomba D460N- 105 etapas
3	Manejador de Gas POSEIDON D8-42
4	Separador de Gas D20-60
5	Protector LSBPB
6	Protector LSBPB
7	Motor f044
8	Sensor tipo 1



CURVA DE EFICIENCIA DE LA BOMBA



Fuente: Artificial lift design and analysis software DesignPro. Property of Schlumberger. All rights reserved.

Tabla 4. Información técnica del pozo 1

DESCRIPCION	PROPUESTA
CONDICIONES DEL POZO	
Presión en Cabeza	140 psig
Temperatura en cabeza	110 °F
Temperatura del yacimiento	210 °F
PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS	
Gravedad API	8.6 °API
Corte de Agua	52%
Relación gas-aceite	50 SCF/STB
IPR	
Índice de productividad	0.69 STB/d/psi
Presión estática	900 psig
CONDICIONES DE LA BOMBA	
Profundidad de asentamiento	7000 ft
Caudal de operación	200 STB/d
Levantamiento dinámico total (TDH)	6552.758 ft
Presión de succión	181.1 psig
Presión de descarga	3071.3 psig
Frecuencia de operación	55 Hz
INFORMACION DE LA BOMBA	
Potencia requerida	36.1 hp
Eficiencia	31.89%
Numero de etapas	242
CONDICIONES DEL MOTOR	
Potencia requerida del motor	55.31 HP
Amperaje	18.3 Amps
Voltaje	1682.9 Volts
Eficiencia	89.13%
CONSUMO ELECTRICO	
Voltaje en superficie	1750.1 Volts
kVA requeridos	56.29

Fuente: Artificial lift design and analysis software DesignPro. Property of Schlumberger. All rights reserved.

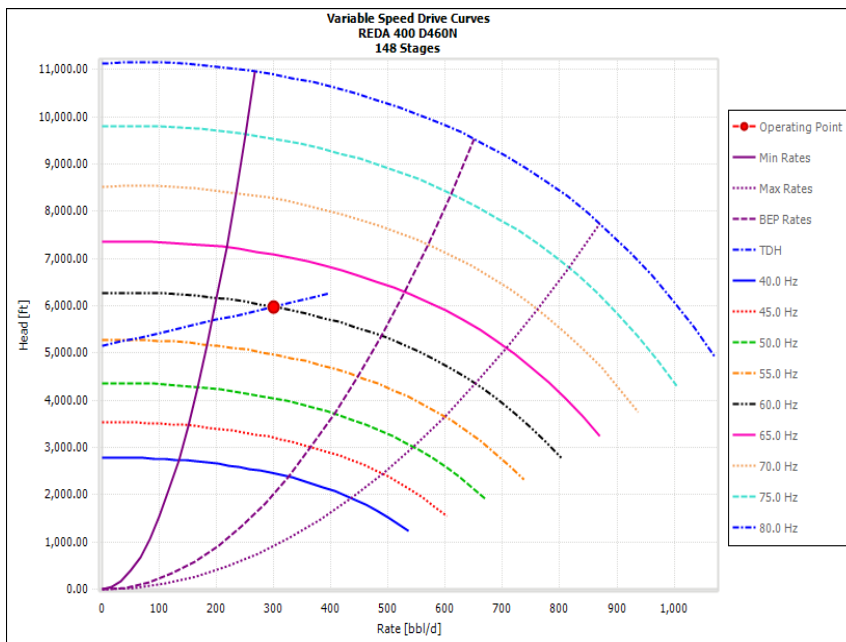
3.2.2 Diseño pozo 2. A continuación se presenta el diseño del equipo propuesto para el pozo 2 y posteriormente se presenta la información técnica después de correr las simulaciones realizadas en el programa DesignPro bajo las condiciones planteadas.

Ilustración 20 Equipo propuesto para el pozo 2

ITEM	DESCRIPCION
1	Bomba D460N- 74 etapas
2	Bomba D460N- 74 etapas
3	Manejador de Gas POSEIDON D8-42
4	Separador de Gas D20-60
5	Protector LSBPB
6	Protector LSBPB
7	Motor f044
8	Sensor tipo 1



CURVA DE EFICIENCIA DE LA BOMBA



Fuente: Artificial lift design and analysis software DesignPro. Property of Schlumberger. All rights reserved.

Tabla 5 Información técnica del pozo 2

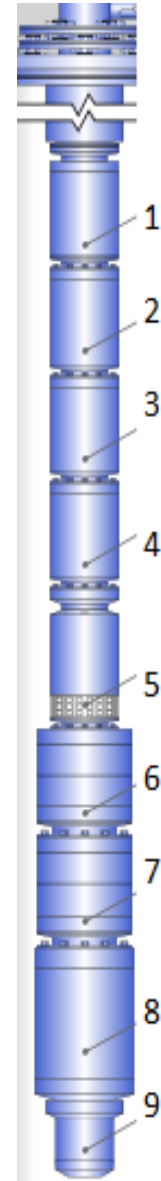
DESCRIPCION	PROPUESTA
CONDICIONES DEL POZO	
Presión en Cabeza	150 psig
Temperatura en cabeza	105 °F
Temperatura del yacimiento	223 °F
PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS	
Gravedad API	8.2 °API
Corte de Agua	66%
Relación gas-aceite	103 SCF/STB
IPR	
Índice de productividad	0.83 STB/d/psi
Presión estática	1100 psig
CONDICIONES DE LA BOMBA	
Profundidad de asentamiento	7200 ft
Caudal de operación	400 STB/d
Levantamiento dinámico total (TDH)	5983.3 ft
Presión de succión	319.3psig
Presión de descarga	3149.3 psig
Frecuencia de operación	60 Hz
INFORMACION DE LA BOMBA	
Potencia requerida	27.3 hp
Eficiencia	46.56%
Numero de etapas	148
CONDICIONES DEL MOTOR	
Potencia requerida del motor	41.75 HP
Amperaje	15.7 Amps
Voltaje	2019.4Volts
Eficiencia	87.65%
CONSUMO ELECTRICO	
Voltaje en superficie	2078.7 Volts
kVA requeridos	56.39

Fuente: Artificial lift design and analysis software DesignPro. Property of Schlumberger. All rights reserved

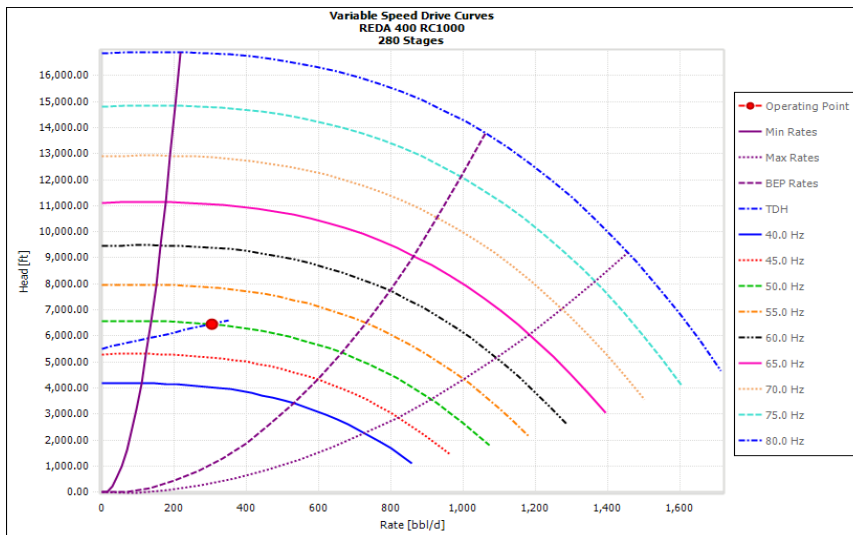
3.2.3 Diseño pozo 3. A continuación se presenta el diseño del equipo propuesto para el pozo 3 y posteriormente se presenta la información técnica después de correr las simulaciones realizadas en el programa DesignPro bajo las condiciones planteadas.

Ilustración 21 Equipo propuesto para el pozo 3

ITEM	DESCRIPCION
1	Bomba RC1000- 100 etapas
2	Bomba RC1000- 100 etapas
3	Bomba RC1000- 80 etapas
4	Manejador de Gas POSEIDON D8-42
5	Separador de Gas D20-60
6	Protector LSBPB
7	Protector LSBPB
8	Motor f060
9	Sensor tipo 1



CURVA DE EFICIENCIA DE LA BOMBA



Fuente: Artificial lift design and analysis software DesignPro. Property of Schlumberger. All rights reserved.

Tabla 6 Información técnica del pozo 3

DESCRIPCION	PROPUESTA
CONDICIONES DEL POZO	
Presión en Cabeza	120 psig
Temperatura en cabeza	85 °F
Temperatura del yacimiento	200 °F
PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS	
Gravedad API	8.0 °API
Corte de Agua	44%
Relación gas-aceite	103 SCF/STB
IPR	
Índice de productividad	0.73 STB/d/psi
Presión estática	950 psig
CONDICIONES DE LA BOMBA	
Profundidad de asentamiento	6800 ft
Caudal de operación	300 STB/d
Levantamiento dinámico total (TDH)	6462.65 ft
Presión de succión	227.4psig
Presión de descarga	2955.4 psig
Frecuencia de operación	50 Hz
INFORMACION DE LA BOMBA	
Potencia requerida	43.2 hp
Eficiencia	32.50%
Numero de etapas	280
CONDICIONES DEL MOTOR	
Potencia requerida del motor	63.97 HP
Amperaje	52.1 Amps
Voltaje	771.2 Volts
Eficiencia	87.78%
CONSUMO ELECTRICO	
Voltaje en superficie	956.2 Volts
kVA requeridos	86.11

Fuente: Artificial lift design and analysis software DesignPro. Property of Schlumberger. All rights reserved.

3.2.4 Análisis del equipo instalado en el pozo 1 vs el equipo que falló previamente. La bomba previamente instalada en el pozo 1, fue diseñada para trabajar bajo rangos de producción entre 1200 y 480 BPD a nivel de la bomba, pero en los perfiles de temperatura se evidenció que las tasas fueron mucho más bajas que las mencionadas anteriormente, lo que indica que la bomba trabajó con baja sumergencia. Para realizar una propuesta más acertada a las condiciones reales de operación, se tuvieron en cuenta las pruebas de producción medidas en sitio, las cuales reflejan que el caudal de operación está entre 100 y 200 BPD. Teniendo en cuenta las condiciones mencionadas se selecciona la bomba D450N con 242 etapas, la cual se adapta mejor a los rangos de producción actuales.

Adicionalmente se evidenció que, durante el periodo operativo del sistema de bombeo instalado previamente, no se tuvo una condición estable de operación, debido a continuos eventos de bloqueo por gas. Esta condición ocasionó un incremento en la temperatura de los componentes del sistema, afectando principalmente los cojinetes cerámicos de la bomba, finalizando en una fractura de eje. Teniendo en cuenta la medición de la producción de gas del pozo en sitio se pudo realizar una mejor evaluación sobre la condición de operación real del sistema BES y se espera minimizar los bloqueos por eventos de gas asociados. Para ello se selecciona un manejador de gas POSEIDON D8-42, y un separador de gases D20-60, capaces de llevar a cero la fracción de volumen de gas en la entrada de la bomba de acuerdo a las simulaciones realizadas.

3.2.5 Análisis del equipo instalado en el pozo 2 vs el equipo que falló previamente. La bomba previamente instalada en el pozo 2, fue diseñada para trabajar bajo rangos de producción entre 2200 y 600 BPD a nivel de la bomba, pero se evidenció que la bomba estaba trabajando con un 135 BPD según las últimas mediciones realizadas en sitio.

Esta condición de operación genera recalentamiento en los elementos que causa finalmente la fractura del eje, en este caso en el extremo inferior de la bomba lower.

Se tuvo en cuenta el caudal reportado por el cliente en las últimas pruebas de producción para realizar la selección de una bomba que se adapte mejor a las condiciones actuales y pueda trabajar con mayor eficiencia. Se decide usar en el diseño la bomba D460N con 148 etapas.

Adicionalmente se presentaron bloqueos de gas, lo que generó la pérdida de la estabilización y posteriormente fractura del eje. Teniendo en cuenta esta condición se decide seleccionar un manejador de gas POSEIDON D8-42, y un separador de gas D20-60, los cuales son capaces de llevar a cero la fracción de volumen de gas en la entrada de la bomba de acuerdo a las simulaciones realizadas.

3.2.6 Análisis del equipo instalado en el pozo 3 vs el equipo que falló previamente. De acuerdo a la data se evidenció que el completamiento instalado en el pozo no logró el objetivo deseado ya que la bomba fue diseñada para rangos de producción entre 906 y 1816 BFPD a nivel de la bomba, pero se evidenció en los perfiles de temperatura que las tasas fueron mucho más bajas que las mencionadas anteriormente. Se tuvo en cuenta el caudal reportado por el cliente en las últimas pruebas de producción para realizar la selección de una bomba que se adapte mejor a las condiciones actuales y pueda trabajar con mayor eficiencia. Se decide usar en el diseño la bomba RC1000 con 280 etapas, la cual tendrá un mejor desempeño con el caudal actual de acuerdo a las simulaciones.

El equipo presentó condiciones inestables de operación desde el inicio de su vida operativa, presentando múltiples bloqueos por gas y variaciones de temperatura de operación a nivel del equipo BES instalado dentro de la capsula, lo cual afectó notablemente algunos de los componentes internos, en este caso en particular degradó el EPDM de dos de las fases del MLE, impidiendo que el compuesto aislara adecuadamente el sistema. Cabe resaltar que la falla no corresponde a un corto circuito sino a un bajo aislamiento. Para realizar el diseño propuesto se tuvo en cuenta el comportamiento previo y la cantidad de gas reportada en las pruebas de producción, por tal razón se decide seleccionar un manejador de gas POSEIDON

D8-42, y un separador de gas D20-60, los cuales son capaces de llevar a cero la fracción de volumen de gas en la entrada de la bomba de acuerdo a las simulaciones realizadas.

3.3 ANALISIS FINANCIERO

Para conocer la viabilidad de los diseños propuestos se debe realizar un análisis económico, A continuación, se presenta el consumo eléctrico mensual, considerando el costo del KW/h en los campos estudiados es de 0.14 US\$, del equipo al que se le realizo el análisis de falla y el equipo propuesto.

Tabla 7 Consumo eléctrico mensual

POZO 1		
DESCRIPCION	EQUIPO ANALISIS DE FALLA	PROPUESTA
Costo eléctrico mensual (US\$)	21421.13	10225.1925
POZO 2		
DESCRIPCION	EQUIPO ANALISIS DE FALLA	PROPUESTA
C Costo eléctrico mensual (US\$)	15106.37	5256.89
POZO 3		
DESCRIPCION	EQUIPO ANALISIS DE FALLA	PROPUESTA
Costo eléctrico mensual (US\$)	30309.68	21940.8575

Como puede observarse en la tabla anterior el consumo por mes disminuyó considerablemente en los diseños propuestos, debido a que los nuevos requerimientos del cliente, incluyen un caudal menor y por ende un motor más pequeño.

Con un precio de crudo de \$51,64/Barril, se necesitarían aproximadamente 814,63 barriles de aceite producido para costear el costo de la sarta ESP junto con el servicio de instalación del pozo 1, 806 barriles de aceite para costear el equipo del pozo 2 y 1027 barriles para costear el equipo del pozo 3.

Tabla 8 Costo estimado de los equipos propuestos

COSTOS ASOCIADOS			
POZO	COSTO DEL EQUIPO	SERVICIO INSTALACION	TOTAL
POZO 1	41068.54	10000	42068.54
POZO 2	40639.89	10000	41639.89
POZO 3	52068.54	10000	53068.54

4 CONCLUSIONES

En los diseños previos, las bombas fueron diseñadas para trabajar bajo rangos de producción mayores a los evidenciados en los perfiles de temperatura, lo que indica que las bombas trabajaron con baja sumergencia. Por tal razón, los diseños propuestos fueron realizados basados en las últimas pruebas de producción reportadas por el cliente, donde se refleja una tasa de producción menor logrando así, un escenario más real en cada pozo.

En el pozo 2 es recomendable evaluar posibilidad de instalar Guarda cable adiabático con el fin de evitar que la temperatura pueda afectar el MLE.

Las condiciones operativas indican que los pozos 1, 2 y 3 pueden presentar una comunicación entre sí y afectar la estabilidad operativa de los sistemas electrosumergibles cuando los mismos están trabajando al mismo tiempo. Con lo observado en estas intervenciones, es recomendable evaluar el comportamiento de cada pozo de manera individual y establecer la variación (Máximas y Mínimas) en los datos de diseño que podría tener cada pozo para evaluar todos los casos posibles con la finalidad de confirmar que el sistema de levantamiento cubra el mayor rango operativo y se tenga la mayor flexibilidad posible.

5 RECOMENDACIONES

Se recomienda evaluar la mayor cantidad de escenarios posibles durante la etapa de diseño como IP, GOR, viscosidades para poder determinar los límites de operación del equipo a instalar.

Se recomienda hacer medición de la producción de gas del pozo en sitio, para poder evaluar la condición de operación real del sistema BES y así minimizar los bloqueos por eventos de gas asociados.

BIBLIOGRAFIA

AL, Engineering. Artificial Lift Engineering Operations Reference Manual – Downhole. Intouch Support: AL-ESP Field Services & Bypass Sy., 2016. 3255850.

AL, Engineering. Artificial Lift Field Operations Reference Manual – Surface. Intouch Support: AL-Surface Electrical., 2016. 1658713429.

ALVAREZ TORRADO, German Orlando. Optimización de producción, consumo de energía y nivel de armónicos para equipos de bombeo electrosumergible en un campo petrolero de la magdalena medio. Universidad Industrial de Santander: Tesis de pregrado., Bucaramanga. 2011.

ARTIFICIAL LIFT AE ESP 1 TRAINING. Pumps and TDH. Schlumberger: Curso ESP 1.

ARTIFICIAL LIFT AE ESP TRAINING. Outflow and System. Schlumberger: Curso ESP 1.

LEON BAEZ, Carlos Humberto. Optimización de la producción y disminución de consumo de energía en pozos con niveles de armónicos altos en un campo petrolero ubicado en los llanos orientales con bombeo electro sumergible como sistema de levantamiento artificial. Universidad Industrial de Santander: Tesis de pregrado. Bucaramanga: 2012

SCHLUMBERGER. Bombeo Electro Sumergible (BES) Lista de Verificación de Instalación. Intouch Support: Artificial Lift Engineering, 2016. 6338508.

SCHLUMBERGER. ESP Motor Nomenclature – Updated. Intouch Support: Artificial Lift Engineering, 2008.

Schlumberger. DIFA best practice in Central America. 2012. Updated. Intouch Support: Artificial Lift Engineering, 2008.

Schlumberger. Dismantle, Inspection, and Failure Analysis (DIFA) Reference Manual for REDA Electric Submersible Pumping Systems. 2009. Updated. Intouch Support: Artificial Lift Engineering, 2009.

Schlumberger. ESP DIAGNOSTICS AND OPTMIZATION. 2015. Updated. Intouch Support: Artificial Lift Engineering, 2010.

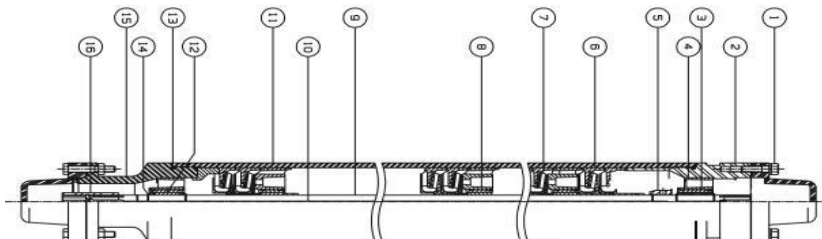
Schlumberger. ESP Failure Investigation Guidelines. 2009. Updated. Intouch Support: Artificial Lift Engineering, 2012.

Schlumberger. Potential Failure Modes & Potential Root Causes of Failure for ESP. 2008. Updated. Intouch Support: Artificial Lift Engineering, 2009.

ANEXO A DESCRIPCIÓN DE MATERIALES

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LOS MATERIALES USADOS

Ilustración 22 Diagrama partes de la bomba



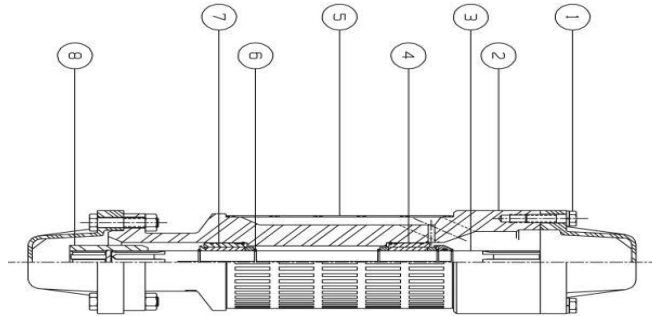
Fuente: Tomado de SCHLUMBERGER. Artificial Lift Field Operations Reference Manual – Downhole. Schlumberger Surenco S.A.

Tabla 9 Materiales de la bomba

Parte	Nombre	Material
1	Unit bolts	Acero ASI 3140,4037
2	Head	Acero 8620
3	Bushing	Zirconia o carburo de silico
4	Bearing support	Ni-Resist
5	Keystop	Monel R-405
6	Diffuser	Ni-Resist
7	Impeller	Ni-Resist
8	Stage bearing	Ni-Resist
9	Shaft	Monel K500
10	Keystock	Monel K501
11	Housing	Acero C1026
12	Shaft sleeve	Zirconia o carburo de silico
13	O-rings	HSN o Aflas
14	Snap ring	Monel K500
15	Base	Acero 8620
16	Coupling	Mone R-405

Fuente: Tomado y modificado de SCHLUMBERGER. ESP System, components, materials and specifications. Schlumberger Surenco S.A.

Ilustración 23 Diagrama partes del intake



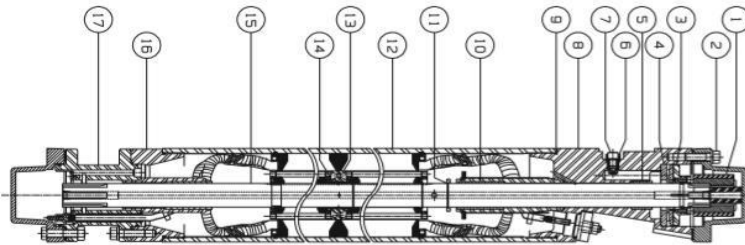
Fuente: Tomado de SCHLUMBERGER. Artificial Lift Field Operations Reference Manual – Downhole. Schlumberger Sureco S.A.

Tabla 10 Materiales del intake

Parte	Nombre	Material
1	Unit bolts	Acero ASI 3140,4037
2	Base	Acero 8620
3	Shaft	Monel K500
4	Bushing	Zirconia o carburo de silicio
5	Screen	Acero inoxidable 430
6	Snap ring	Monel K500
7	Shaft sleeve	Zirconia o carburo de silicio
8	Coupling	Monel R-405

Fuente: Tomado y modificado de SCHLUMBERGER. ESP System, components, materials and specifications. Schlumberger Sureco S.A

Ilustración 24 Diagrama partes del motor



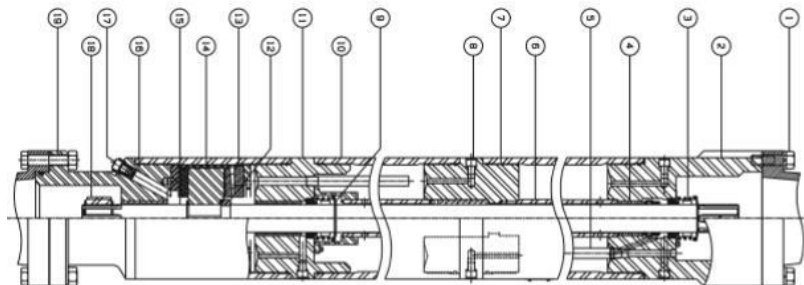
Fuente: Tomado de SCHLUMBERGER. Artificial Lift Field Operations Reference Manual – Downhole. Schlumberger Sureco S.

Tabla 11 Materiales del motor

Parte	Nombre	Material
1	Coupling	Acero 4140
2	Unit bolts	Acero AISI 3140, 4037
3	Thrust runner	Acero C1117
4	Thrust bearing	Acero glacier Hi-Ex
5	Lower bushing	Bronce SAE 660
6	Drain and fill valve	Acero al carbono 12L14
7	Vent plug	Acero al carbono ASTM A307
8	Upper tandem head	Acero 8620
9	O-rings	HSN/Aflas
10	Bushing	Bronce SAE 660
11	Snap rings	Monel K500
12	Stator	Acero 1026
13	Rotor bearing	Aleacion cobalto 6
14	Rotos bearing sleeve	Bronce SAE CA932
15	Shaft	Acero 4130
16	Adapter	Acero 8620
17	Lead connection base	Acero 8621

Fuente: Tomado y modificado de SCHLUMBERGER. ESP System, components, materials and specifications. Schlumberger Surencó S.A.

Ilustración 25 Diagrama partes del protector



Fuente: Tomado de SCHLUMBERGER. Artificial Lift Field Operations Reference Manual – Downhole. Schlumberger Surencó S.A.

Tabla 12 Materiales del protector

Parte	Nombre	Material
1	Unit bolts	Acero ASI 3140,4037
2	Head	Acero 8620
3	Shaft seal	Carburo de silico, acero inoxidable
4	Bushings	Bronce SAE 660
5	Chamber tbe	Acero inoxidable 316
6	Shaft tube	Acero 1020
7	Bushing body	Acero 8620
8	Vent plug	Acero al carbon ASTM A307
9	Snap ring	Monel K500
10	Housing	Acero 1026
11	Seal body	Acero 8620
12	Two-piece ring	Monel R-405
13	Thrust bearing	Bronce R3
14	Thrust runner	Acero C1117
15	Shaft	Monel K500
16	O-rings	HSN o Aflas
17	Drain and fill valve	Acero al carbon 12L14
18	Cupling adaptor	Acero 1042
19	Base	Acero 8620

Fuente: Tomado y modificado de SCHLUMBERGER. ESP System, components, materials and specifications. Schlumberger Surencó S.A.

Tabla 13 Tipos de Aislante del cable

TERMOPLÁSTICO	TERMOSET	AISLAMIENTO DE POLIPROPILENO
<ul style="list-style-type: none"> • Punto de fusión definido • Limitada por la temperatura • Facilidad de procesamiento • Formulaciones simples • El fallo térmico suele ser dramático 	<ul style="list-style-type: none"> • Sin punto de fusión • A menudo, una mayor temperatura nominal • Más difícil de procesar • Formulaciones complejas • El fallo térmico suele ser gradual 	<ul style="list-style-type: none"> • Excelente resistencia a fluidos de pozo • Excelentes propiedades eléctricas • Bajo costo • Disponible en tres colores diferentes

Fuente: Tomado y modificado de SCHLUMBERGER. ESP System, components, materials and specifications. Schlumberger Surencó S.A.

ANEXO B REGISTRO FOTOGRÁFICO

REGISTRO FOTOGRÁFICO DESMANTELAMIENTO EQUIPO BES POZO 1

Ilustración 26 Bomba superior

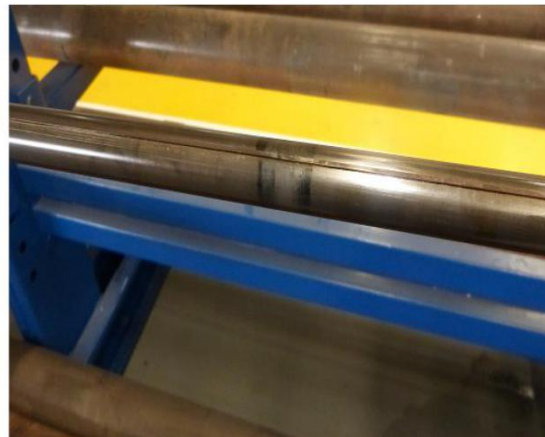
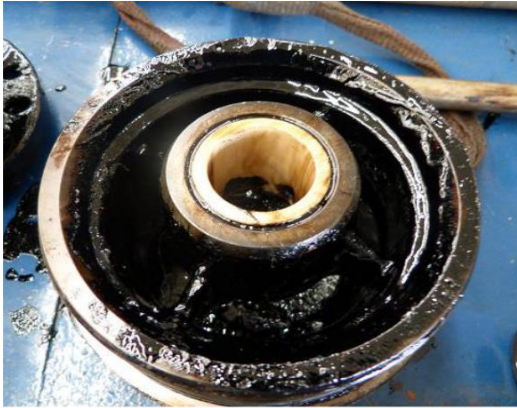


Ilustración 27 Bomba central

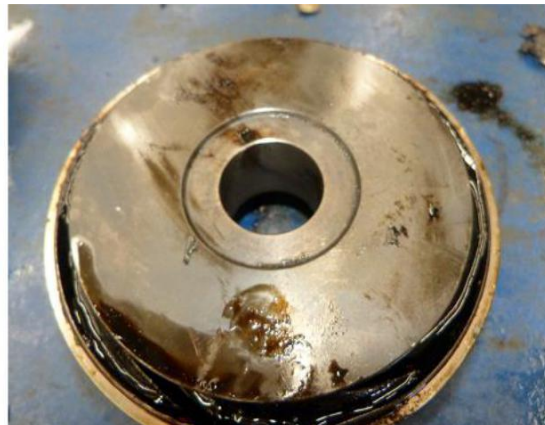


Ilustración 28 Bomba inferior

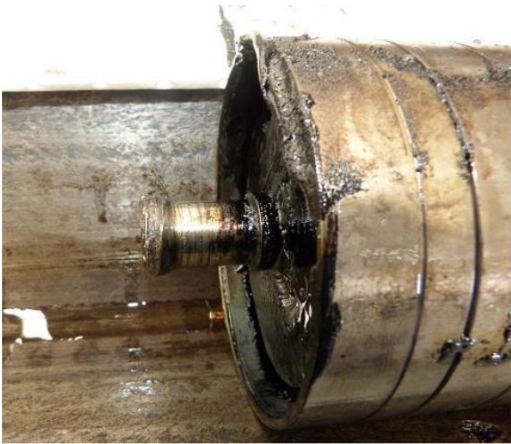


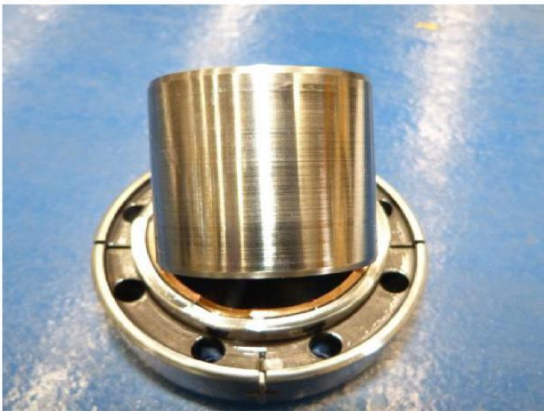
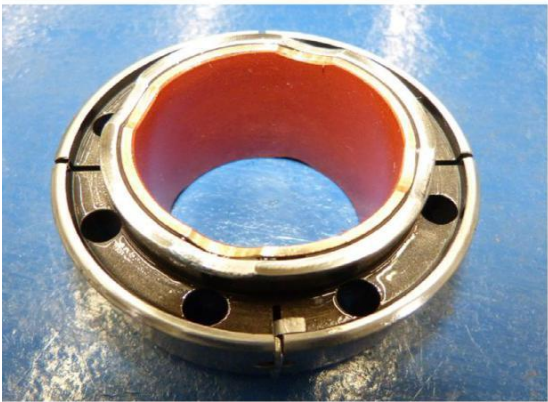
Ilustración 29 Protector superior



Ilustración 30 Protector inferior



Ilustración 31 Motor



REGISTRO FOTOGRÁFICO DESMANTELAMIENTO EQUIPO BES POZO 2

Ilustración 32 Bomba superior



Ilustración 33 Bomba inferior



Ilustración 34 Manejador de gas



Ilustración 35 Protector superior



Ilustración 36 Protector inferior

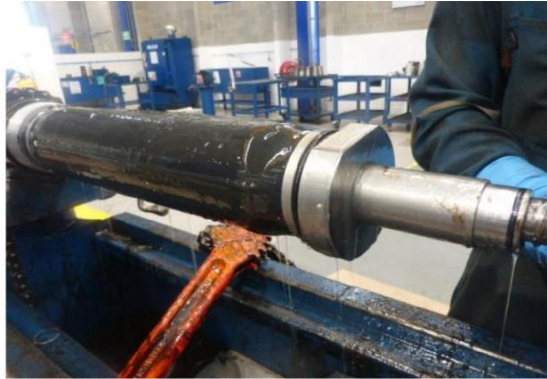
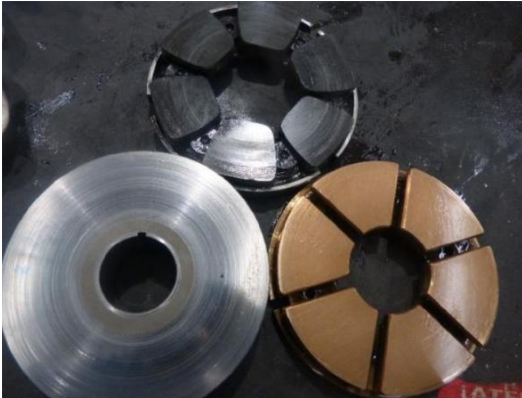


Ilustración 37 Motor



REGISTRO FOTOGRÁFICO DESMANTELAMIENTO EQUIPO BES POZO 3

Ilustración 38 Bomba Superior



Ilustración 39 Bomba Center



Ilustración 40 Bomba inferior



Ilustración 41 Manejador de gas

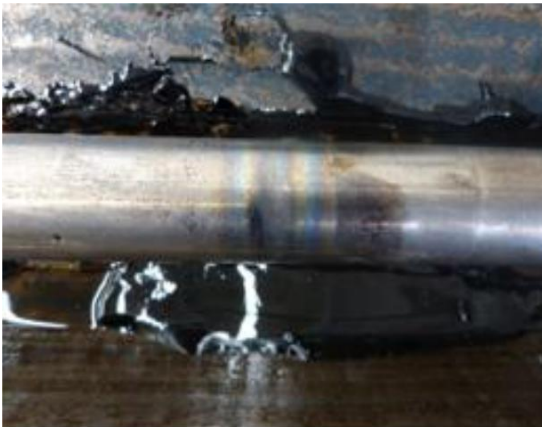


Ilustración 42 Protector superior



Ilustración 43 Protector inferior



Ilustración 44 Motor



ANEXO C ANÁLISIS DE FALLA

ANÁLISIS DE FALLA PARA EL POZO 2

En el pozo 2, se han realizado cinco instalaciones por parte de Schlumberger. El servicio de run #1 se ejecutó el 21 de junio de 2012 y el día 23 de febrero de 2013 se realizó la extracción de equipo completando un run life total de 247 días. El servicio de run #2 se ejecutó el 28 de febrero de 2013 y el día 8 de octubre de 2014 se realizó la extracción de equipo completando un run life total de 587 días. El servicio de run #3, se ejecutó el 12 de octubre de 2014 y el día 30 de mayo de 2015 se realizó la extracción de equipo completando un run life total de 230 días. El servicio de run #4 se ejecutó el 4 de junio de 2015 y el día 13 de junio de 2016 se realizó la extracción de equipo completando un run life total de 375 días. Finalmente, el servicio de run #5 se ejecutó el 17 de junio de 2016 y el 20 de mayo de 2017 se realizó la extracción de equipo completando un run life total de 337 días.

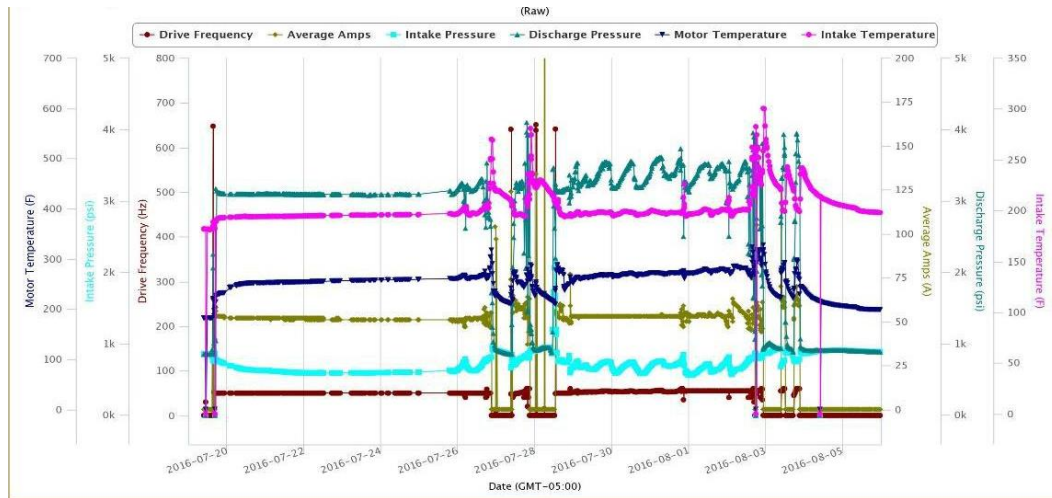
Tabla 14 Historia de instalaciones BES en el pozo 2

Equipo	fecha instalación	fecha de pull	run life	razón del pull
BES	21-Jun-12	23-Feb-13	247	falla mecánica
BES	28-Feb-13	8-Oct-14	587	Perdida de producción
BES	12-Oct-14	30-May-15	230	falla mecánica
BES	4-Jun-15	13-Jun-16	375	perdida de producción
BES	17-Jun-16	20-May-17	337	Problema eléctrico

Fuente: Tomado y modificado de Schlumberger. Illumina. Software para el almacenamiento de información de Artificial Lift. 2008

Eventos del sensor. Julio 19, 2016. Se realiza arranque del pozo, en condiciones estables sin mayores inconvenientes; equipo BES opera de manera estable con producción en superficie y parámetros de fondo estable por aproximadamente 8 días.

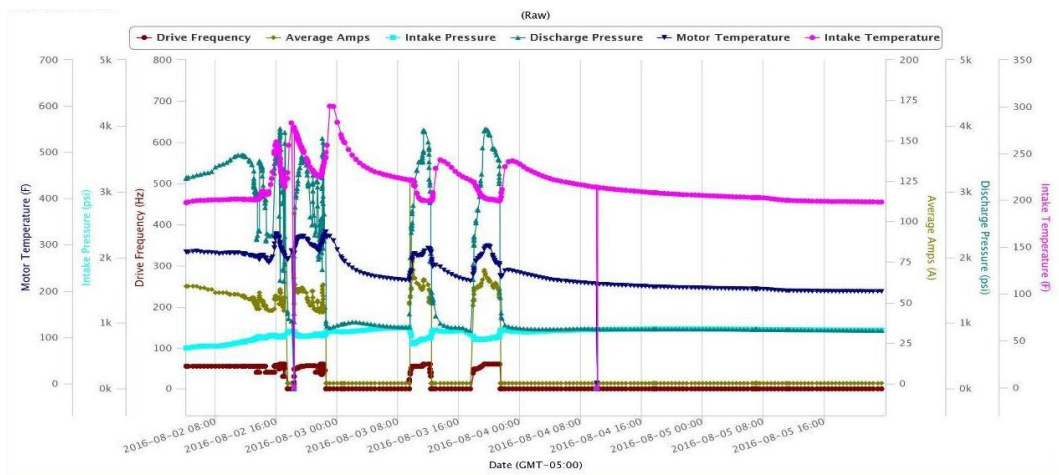
Ilustración 45 Datos del sensor del 20-Jul-16 al 5-Ago-16



Fuente: Tomado y modificado de Schlumberger. Zediacces. Plataforma especializada en manejo de producción y operaciones

Periodo del 28 de Julio al 02 de agosto, 2016. Equipo BES presenta comportamiento inestable y constantes bloqueos por gas con pérdida de producción en superficie; cabe destacar que durante este periodo ya los pozos 1 y pozo 3 fueron arrancados y diferentes maniobras estaban siendo realizadas.

Ilustración 46 Datos del sensor del 2-Ago-16 al 5-Ago-16

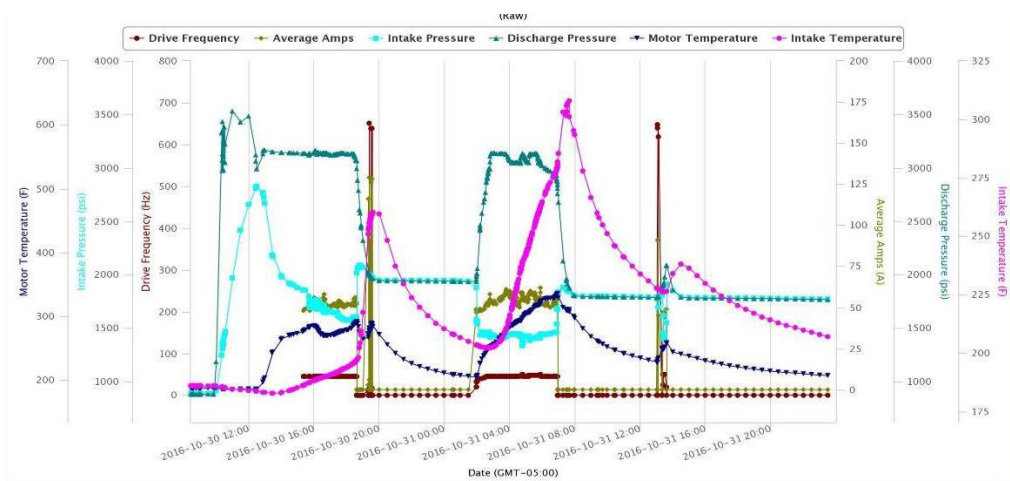


Fuente: Tomado y modificado de Schlumberger. Zediacces. Plataforma especializada en manejo de producción y operaciones

Agosto 02, 2016. Luego de pararse el equipo BES por perdida de producción (bloqueo por gas), se trata de realizar un nuevo intento de arranque, observando una mayor presión diferencial para una misma frecuencia, lo que es característico de una restricción en el levantamiento de la bomba, fuese esto por incremento de presión de cabeza y/o enfriamiento de fluido de bajo API en la tubería.

Se recomienda realizar una nueva recirculación, para minimizar esta restricción en el requerimiento de levantamiento y poner el pozo en producción nuevamente, sin embargo, por restricciones operativas esta operación no se realiza y el BES queda parado para nueva evaluación. La integridad de los equipos BES se verifica y se encuentra en buenas condiciones eléctricas y mecánicas.

Ilustración 47 Datos del sensor del 30-Oct -16 al 31-Oct-16



Fuente: Tomado y modificado de Schlumberger. Zediacces. Plataforma especializada en manejo de producción y operaciones

Octubre 30, 2016. Luego de realizar una inyección en directa de fluido, se procede a realizar intento de arranque, pero se presentan alarmas por temperatura de intake, esto debido a la pobre refrigeración del sistema BES porque el pozo todavía tenía mucho fluido controlando el aporte del mismo.

Octubre 31, 2016. Se modifica la alarma de temperatura de intake de 260 degF a 280 degF, para incrementar el rango de temperatura durante la evacuación del fluido; El equipo BES arranca sin inconvenientes a una frecuencia de 40 hz; luego de casi 45 minutos de operación se incrementa la frecuencia a 45 hz, se obtiene fluido en superficie e inicia incremento en la presión de descarga. La operación del sistema continua hasta que la temperatura de intake alcanza el valor de 280 degF; equipo BES se detiene por falta de refrigeración. El sistema electrosumergible se deja parado para posterior evaluación; las condiciones eléctricas y mecánicas se mantienen operativas.

Observaciones durante el desmantelamiento del equipo

Tabla 15 Equipo inspeccionado

Equipo	Equipo inspeccionado	Comentarios
Bomba Superior	PUMP: GN4000	Etapas con desgaste moderado en downthrust. Bujes con marcas de temperatura.
Bomba Inferior	PUMP: GN4000	Desgaste moderado en downthrust, fractura de eje en el extremo inferior.
Manejador de gas	MGH: S50-90	Perdida de cojinetes de estabilización radial, etapas en su mayoría con desgaste severo.
Intake	INTAKE: BOI	Eje suelto, perdida de estabilización radial.
Sello Superior	PROTECTOR: LSBPB	Perdida de estabilización en cabeza, contaminado hasta la primera cámara.
Sello Inferior	PROTECTOR: LSBPB	Aceite limpio en su totalidad.
Motor	MOTOR: 562, 15, F152	Motor en aceptables condiciones eléctricas y mecánicas. MLE a tierra y motor en aceptables condiciones marcas de sobre tensión.
Sensor	BASE GAUGE: XT150 TYPE 1	Parámetros dentro de rango de operación.

- Bomba superior: El housing sin marcas longitudinales de arrastre o pérdida de material sobre la superficie externa. Medidas de eje por fuera del rango de aceptación según plano, giro restringido y sin desplazamiento axial. El eje presenta manchas lo que sugiere alta temperatura, dicha condición es más evidente en las áreas donde se encontraban ubicados los cojinetes cerámicos de las etapas ARZ, pero no registra marcas de desgaste radial o deformación plástica sobre los splines. Las etapas se encuentran con desgaste moderado, focalizado en las superficies de empuje descendente. Algunos de los bujes estáticos en las etapas ARZ, aunque se encontraban en la posición correcta, se encontraban totalmente sueltos dentro de la cavidad de los difusores por la pérdida de los compliant o'ring, encargados de sujetar los bujes a sus respectivos difusores. En el interior de la bomba no se encuentra presencia de material foráneo.
- Bomba inferior: El housing sin marcas longitudinales o pérdida de material sobre la geometría externa del housing por arrastre o corrosión. Medidas de eje por fuera del rango de aceptación, sin giro. Al interior de la bomba se encontró únicamente “crudo viscoso”. Desgaste radial moderado en los Bushings y sleeves, algunos de los cojinetes estáticos se encontraron completamente sueltos hasta el punto de generarse el desprendimiento total de uno de estos en una de las etapas inferiores. Desgaste moderado en las superficies en downthrust de los difusores e impulsores. El eje estaba partido sobre una de las etapas ARZ en la etapa 52 de base a cabeza, las áreas adyacentes a la fractura presentan signos de recalentamiento. En el interior no se encontraron sólidos.
- Manejador de gas: Eje con giro restringido, fuera de medidas en base y cabeza de acuerdo al plano de ingeniería. El eje se encuentra con leves marcas de desgaste radial y de temperatura en las áreas donde se ubican los cojinetes de estabilización. Los componentes de estabilización radial se encontraron en gran proporción con fracturas parciales. La pérdida de estabilización en algunas etapas genero el desgaste severo de las etapas generalizado sobre sus superficies.

- Intake: No se evidencian vestigios de erosión en los agujeros de admisión y/o superficies internas del intake. Perdida de los cojinetes de estabilización radial y como consecuencia se presenta desgaste radial sobre el eje.
- Protector superior: Housing sin marcas longitudinales o de corrosión, leves manchas que sugieren operación a alta temperatura. Perdida de estabilización radial en la cabeza del protector. Eje con giro libre, sin embargo, las ausencias de los cojinetes radiales en cabeza propiciaron desgaste radial en el elemento en ese punto. Contaminación con fluido de pozo en la primera cámara y exterior de las bolsas. En el interior de las bolsas y en la cámara de empuje había aceite trabajado sin contaminación externa. El primer sello mecánico se encontraba destruido, consecuencia también de la ausencia de los bujes radiales en cabeza; el segundo sello se encontraba en aceptables condiciones operativas. Los cojinetes de la cámara de empuje, zapata HL, Zapata NTB y runner presentaron tan solo desgaste ligero sobre las interfaces de fricción. Los o'ring presentaron leve deformación por temperatura.
- Protector inferior: El housing del protector inferior se encuentra en buenas condiciones físicas, con ligeras marcas de temperatura. En el interior predominaba completamente aceite limpio sin contaminación externa. Los dos sellos mecánicos retienen la presión en prueba de hermeticidad, ambos elementos se encontraron operativos. Los cojinetes de la cámara de empuje en downthrust y upthrust registran desgaste ligero sobre las superficies de fricción.
- Motor: El motor se encontró en buenas condiciones externas, con leves marcas de temperatura; luego de remover el remanente del MLE, se encuentra que el motor presenta continuidad normal (0.6 ohms) y aislamiento con respecto a tierra: 2 Gigaohms @ 1000Vol. Los componentes de empuje se encontraron en aceptables condiciones, sin desgaste considerable en superficies de fricción. Internamente contenía aceite trabajado sin contaminación externa. Los elementos del conjunto rotórico no presentaron desgaste relevante. El MLE presentaba discontinuidad en la coraza y en los compuestos aislantes al parecer por tensión, luego de realizar prueba eléctrica se encuentra que la "Fase B" se encuentra a tierra, las otras dos fases presentaron bajo aislamiento; en el punto de la conexión del MLE del motor se evidencian marcas de corto eléctrico.

ANÁLISIS DE FALLA PARA EL POZO 3

En el pozo 3, se han realizado tres instalaciones por parte de Schlumberger. El servicio de run #1 se ejecutó el 12 de diciembre de 2014 y el día 15 de mayo de 2015 se realizó la extracción de equipo completando un run life total de 156 días. El servicio de run #2 se ejecutó el 20 de mayo de 2015 y el día 19 de mayo de 2016 se realizó la extracción de equipo completando un run life total de 360 días. El servicio de run #3, se ejecutó el 6 de junio de 2016 y el día 18 de mayo de 2017 se realizó la extracción de equipo completando un run life total de 62 días.

Tabla 16 Historia de instalaciones BES en el pozo 3

Equipo	fecha instalación	fecha de pull	run life	razon del pull
BES	12-Dec-14	17-May-15	156	Falla eléctrica, sólidos
BES	20-May-15	19-May-16	360	Pérdida de producción
BES	6-Jun-16	18-May-17	62	Falla eléctrica

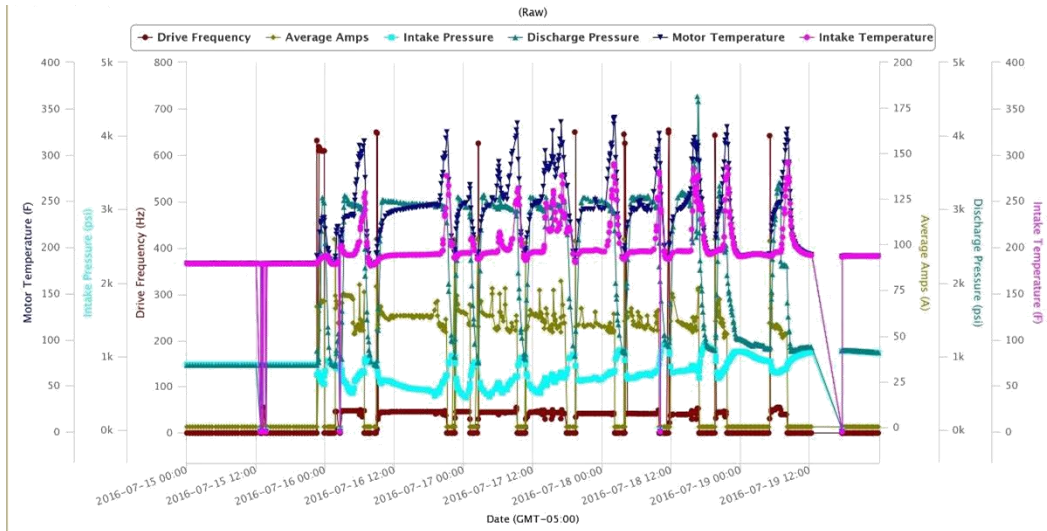
Fuente: Tomado y modificado de Schlumberger. Illumina. Software para el almacenamiento de información de Artificial Lift. 2008

Eventos del sensor. Julio 15, 2016 se arranca el equipo BES, hasta el día 19 de Julio 2016, se observa condiciones constantes de bloqueo en la producción del sistema, trayendo como consecuencia que el motor y el sensor dentro de la capsula no se refrigeren adecuadamente activando las protecciones de temperatura.

20 de Julio, 2016, se arranca de nuevo el equipo BES, el cual, opera estable por un intervalo de un día para después presentar nuevamente problemas de bloqueo, finalmente presenta una pérdida de datos de fondo el día 22 de Julio de 2016. Durante la operación se observan condiciones constantes en la carga del motor, pero inestables en la presión de intake, contemplándose un disminución en la entrada de fluido en la capsula del sistema BES. Los anterior podría suponer una posible limitación en la entrada

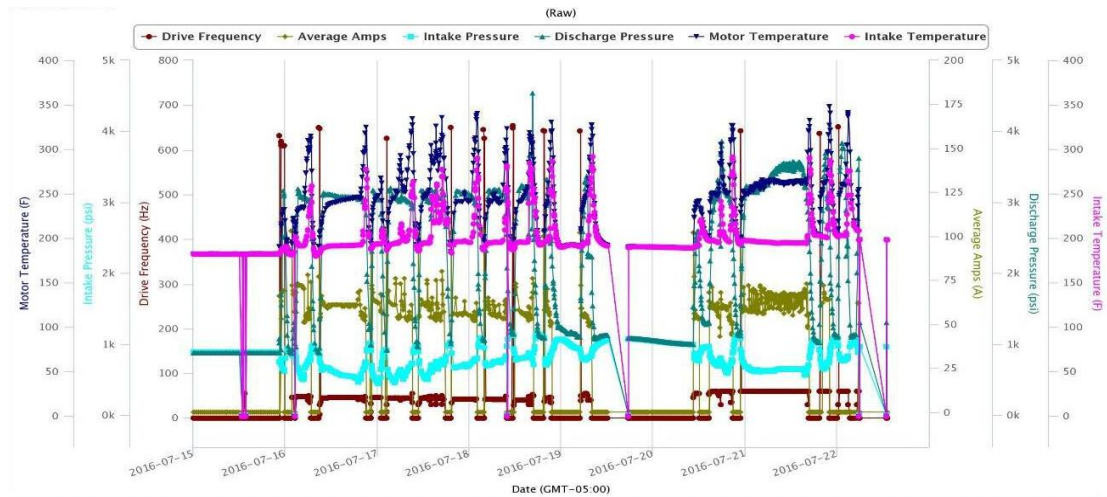
de fluido a la capsula del sistema BES, haciendo que no se tenga producción adecuada a través del equipo de fondo y en consecuencia perdida de fluid en superficie

Ilustración 48 Datos del sensor del 15-Jul-16 al 19-Jul-16



Fuente: Tomado y modificado de Schlumberger. Zediaccs. Plataforma especializada en manejo de producción y operaciones

Ilustración 49. Datos del sensor del 15-Jul-16 al 22-Jul-16



Fuente: Tomado y modificado de Schlumberger. Zediaccs. Plataforma especializada en manejo de producción y operaciones

Observaciones durante el desmantelamiento del equipo

Equipo	Equipo inspeccionado	Comentarios
Bomba Superior	PUMP: GN4000	Desgaste moderado en etapas, cojinetes radiales en aceptables condiciones.
Bomba Central	PUMP: GN4000	Desgaste moderado en etapas, cojinetes radiales en aceptables condiciones.
Bomba Inferior	PUMP: GN4000	Desgaste moderado en etapas, cojinetes radiales en aceptables condiciones.
Manejador de gas	MGH: S50-90	Eje con marcas de temperatura, bujes radiales con fisuras.
Intake	INTAKE: BOI	Giro libre, desgaste ligero en estabilización.
Sello Superior	PROTECTOR: MAXIMUS, LSBPB	Contaminado en las tres cámaras, sellos mecánicos con desgaste en elastómeros.
Sello Inferior	PROTECTOR: MAXIMUS, LSBPB	Primera cámara contaminada, las dos siguientes cámaras con aceite limpio en el interior.
Motor	MOTOR: 562, 15, F152	Motor en aceptables condiciones eléctricas y mecánicas. MLE con bajo aislamiento en dos de sus fases.
Sensor	BASE GAUGE: XT150 TYPE 1	Parámetros dentro de rango de operación.

- Bomba superior: Housing sin marcas longitudinales de arrastre o pérdida de material. Medidas de eje dentro del rango de aceptación según plano, sin giro y sin desplazamiento axial. Etapas con desgaste moderado en: Impulsores: skirt y

balance ring; a excepción de la primera y última etapa donde se aprecia desgaste severo en upthrust tanto de difusores como impulsores. Los cojinetes de estabilización radial no presentaron desgaste considerable, aunque se registra coloración oscura sobre las superficies de fricción. Los washers de upthrust aún se encuentran en posición. En el interior no se observa presencia de material foráneo que afecte el funcionamiento normal del equipo. El eje por su parte presenta marcas de desgaste radial y deformación plástica sobre el keyway en ambos extremos del eje.

- Bomba central: Housing sin marcas longitudinales o pérdida de material sobre la geometría externa del housing. Medidas de eje por fuera del rango de aceptación, eje

con giro restringido. Al interior de la bomba se encontró únicamente “crudo viscoso”. Desgaste radial ligero en los Bushings y sleeves, sin embargo registran manchas de temperatura. Desgaste moderado en las superficies en Downthrust de los difusores e impulsores; por otra parte las áreas de empuje ascendente no presenta desgaste considerable.

- Bomba inferior: La bomba inferior se encuentra en condiciones similares a la bomba central. Housing sin marcas longitudinales o pérdida de material sobre la geometría externa del housing. Medidas de eje por fuera del rango de aceptación, eje con giro restringido. Al interior de la bomba se encontró únicamente “crudo viscoso”.

Desgaste radial ligero en los Bushings y sleeves, sin embargo registran manchas de temperatura. Desgaste moderado en las superficies en Downthrust de los difusores e impulsores; por otra parte las áreas de empuje ascendente no presenta desgaste considerable.

- Manejador de gas: Eje con giro restringido, fuera de medidas en base y cabeza. El eje se encuentra con marcas de temperatura en las áreas donde se ubican los cojinetes de estabilización. Los componentes de estabilización radial se encontraron con desgaste ligero pero con fisuras y grietas sobre su superficie, aunque cabe resaltar que estaban en posición. Las etapas mostraron desgaste

moderado en las superficies downthrust, presentando pérdida de los respectivos washer. En el interior no se evidencia presencia de sólidos.

- Intake: No se evidencian vestigios de erosión en los agujeros de admisión y/o superficies internas del intake. Los componentes de estabilización radial no registraron desgaste considerable en las superficies de fricción. El eje no presenta desgaste radial o signos de torsión sobre los splines.
- Protector superior: Housing sin marcas longitudinales o pérdida de material. Se realizó prueba de hermeticidad a 5 Psi obteniendo que el sistema no presenta fugas en las juntas. Medidas de eje dentro del rango de operación y duro. El eje presenta marcas de temperatura sobre la ranura donde se ubica la runner. O-rings en posición levemente deformados por temperatura (cristalizados y expandidos). El protector se encontró contaminado en su totalidad, con una cantidad considerable de asfáltenos y fluido viscoso a lo largo del equipo. Ambos sellos mecánicos con que cuenta el equipo presentaron pérdida de material sobre el elastómero por desgaste con el eje. Los elementos y áreas de estabilización radial se encontraron en buen estado presentado únicamente desgaste ligero. Los cojinetes de la cámara de empuje se encuentran en condiciones normales de trabajo con desgaste ligero tanto en las superficies en upthrust como en downthrust.
- Protector inferior: Housing sin marcas longitudinales. Eje con giro libre y sin evidencias de deformación plástica en las ranuras. El protector se encontró contaminado hasta el exterior de las bolsas, en el interior de estas se observó tan solo presencia de aceite limpio. Los o-rings no presentaron discontinuidad en los bordes por temperatura. Tanto las bolsas de retención como los sellos mecánicos se encontraron en aceptables condiciones operativas. El cojinete de empuje axial presentó desgaste ligero.
- Motor: Housing sin pérdida de material sobre la parte externa. Se realizó prueba de hermeticidad a 10 Psi obteniendo que el sistema no presenta fugas en las juntas y plugs. El eje presentó medidas de eje dentro del rango de aceptación. Se tomaron mediciones eléctricas iniciales con MLE obteniendo las siguientes condiciones: resistencia fase-fase 0.6 Ohm balanceado y aislamiento 1.25 GΩ. Los componentes del

conjunto rotórico en su totalidad se encontraron en aceptables condiciones operativas, no se evidencia desgaste relevante. No se observó evidencia de daño mecánico o corrosión en la armadura remanente del MLE, sin embargo se puede apreciar cierta coloración oscura en los terminales de conexión con el motor en dos de sus fases.

ANEXOS D DATOS DE DISEÑO

Datos de diseño para el pozo 2

PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS					
API	8.2				
GOR	103				
Gravedad Agua	1				
Gravedad Gas	0.98				
Corte de agua	66%				
Correlaciones PVT sugeridas					
Presion de Burbuja (Pb)	600				
Factor volumetrico (Bo)					
viscosidad (mo)					
WELLBORE					
CASING					
	MD Top (ft)	MD Botton (ft)	OD(in)	ID(in)	Weight
1	0	1023	13 3/8	12.515	61
2	1023	8212	9 5/8	8.281	64.9
TUBING					
	MD Top (ft)	MD Botton (ft)	OD(in)	ID(in)	Weight
1		7200	4 1/2	3.958	12.6
PROFUNDIDAD MEDIA DE PERFORADOS (MD):				7936	
RELACION DE INFLUJO DEL YACIMIENTO					
Presión estática	1100	psi	Indice de Productivi	0.83	BFPD/PSI
Presión de pozo fluyente	800	psi	Caudal de prueba (200	
Temperatura de Yacimiento	223	°F	Modelo IPR		
CONDICIONES REQUERIDAS DE DISEÑO					
		Max	Min		
Rango de caudal		400	100		
Profundidad de asentamiento MD (pies)		xxxTVD		Caudal de Dis	200
Profundidad de asentamiento actual MD (pies)		xxxTVD		Presión de cabeza (psi)	50
Temperatura de Fluido en Cabeza (°F)	105			Presión de anular (psi)	150

Fuente. Cliente de la compañía Schlumberger. Modificado por el autor.

4.2 Datos de diseño para el pozo 3

PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS					
API	8				
GOR	103				
Gravedad Agua	1.02				
Gravedad Gas	0.8296				
Corte de agua	44%				
Correlaciones PVT sugeridas					
Presion de Burbuja (Pb)	620				
Factor volumetrico (Bo)	1.05894				
viscosidad (mo)	227				
WELLBORE					
CASING					
	MD Top (ft)	MD Botton (ft)	OD(in)	ID(in)	Weight
1	0	7399	9 5/8	8.535	53.5
2	7399	8223	7	6.276	26
TUBING					
	MD Top (ft)	MD Botton (ft)	OD(in)	ID(in)	Weight
1		7400	4 1/2	3.958	12.75
PROFUNDIDAD MEDIA DE PERFORADOS (MD):				7975	
RELACION DE INFLUJO DEL YACIMIENTO					
Presión estática	950	psi	Indice de Productividad	0.73	BFPD/PSI
Presión de pozo fluente	800	psi	Caudal de prueba @ Pwf	200	
Temperatura de Yacimier	200	°F	Modelo IPR	Fetkovich	
CONDICIONES REQUERIDAS DE DISEÑO					
		Max	Min		
Rango de caudal		400	100		
Profundidad de asentamiento MD (pies)	7400	xxxxTVD		Caudal de Diseño	200
Profundidad de asentamiento actual MD (pies)	7400			Presión de cabeza (psi)	120
Temperatura de Fluido en Cabeza (°F)	85			Presión de anular (psi)	120

Fuente. Cliente de la compañía Schlumberger. Modificado por el autor.